

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

MIEHITTÄMÄTTÖMÄT ILMA-ALUKSET TAISTELUSSA

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti
Lauri Pitkänen

Sotatieteiden maisterikurssi 7
Maasotalinja

Huhtikuu 2018

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 7	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Lauri Pitkänen	
Tutkielman nimi MIEHITTÄMÄTTÖMÄT ILMA-ALUKSET TAISTELUSSA	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2018	Tekstisivuja 60 Liitesivuja 5
TIIVISTELMÄ <p>Tutkielma käsittelee autonomisia piirteitä omaavia asejärjestelmiä. Tarkoituksena on selvittää, mikä on nykytila tällaisten järjestelmien käytössä sekä luoda kuva niiden hyödynnettävyydestä lähitulevaisuuden taistelukentällä. Lisäksi selvitetään, kuinka aseiden autonomisuuden astetta voidaan mitata. Tutkimus keskittyy tarkastelemaan lentävältä lavetilta toimivien autonomisia piirteitä omaavien asejärjestelmien tekniikkaa ja käyttöperiaatteita.</p> <p>Tutkimuskysymys on: Millaisia ovat autonomisia piirteitä omaavat taisteluilma-alukset?</p> <p>Alatutkimuskysymykset:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Miten autonomiaa voidaan luokitella ja mitata taisteluilma-aluksissa?2. Millaisia taisteluilma-alukset ovat tekniseltä rakenteeltaan?3. Mihin taisteluilma-aluksia käytetään nykyajan taistelukentällä? <p>Ensimmäinen luku: Johdanto ja tausta Tutkielman johdanto ja ensimmäinen kappale muodostaa perusteet tutkielman laatimiselle sekä esittelee tutkimusmenetelmät, tutkimuksen rajaukset ja tutkimuskysymykset.</p> <p>Toinen luku: Autonominen asejärjestelmä Ensimmäinen tutkimuskappale tarkastelee autonomiaa asejärjestelmissä. Miten sitä voidaan määritellä/luokitella? Millainen on tyypillisen järjestelmän rakenne ja käyttöperiaate? Kappaleessa pyritään luomaan yleiskuva järjestelmän toiminnasta. Esimerkeillä ilmennetään autonomisia ominaisuuksia asejärjestelmässä.</p> <p>Kolmas luku: Autonomisen asejärjestelmän tekninen rakenne Osio keskittyy tarkastelemaan asejärjestelmien teknistä rakennetta. Asejärjestelmiä tarkastellaan niiden osajärjestelmien kuten sensoreiden, rungon ja taistelulatauksen avulla.</p> <p>Neljäs luku: Autonomisten asejärjestelmien käyttö Kolmas pääluke tarkastelee asejärjestelmien käyttöä nykyajan taistelukentällä. Lisäksi luku vastaa tutkielman pääkysymykseen SWOT-analyysin avulla.</p> <p>Viides luku: Tutkimustulokset ja johtopäätökset Päätöskappaleessa kootaan yhteen tutkielman tulokset ja analysoidaan niitä sekä selvitetään mahdolliset jatkotutkimusaiheet.</p>	
AVAINSANAT Taisteluilma-alus, UCAV, UCAR, Autonomia, Miehittämätön ilma-alus, Lennokki, Taistelujärjestelmä	

MIEHITTÄMÄTTÖMÄT ILMA-ALUKSET TAISTELUSSA

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Tutkimuksen taustaa.....	2
1.2.	Näkökulma ja rajaukset.....	3
1.3.	Tutkimusmenetelmä ja tutkimuskysymykset.....	3
1.4.	Keskeiset käsitteet.....	5
1.5.	Tutkimuksen rakenne	6
1.6.	Aikaisempi tutkimus	7
2.	AUTONOMISET ASEJÄRJESTELMÄT.....	9
2.1.	Autonomiset ominaisuudet asejärjestelmissä.....	9
2.2.	Järjestelmien kehitys	14
2.3.	Autonomisten ilma-asejärjestelmien käyttöperiaatteita	16
2.4.	Järjestelmän osat	18
2.5.	Esimerkkejä autonomisesta järjestelmästä	19
2.5.1	IAI Harpy	19
2.5.2	MQ-9 Reaper.....	22
2.5.3.	Perdix	25
3.	JÄRJESTELMÄN RAKENNE.....	27
3.1.	Lavetti	27
3.2.	Sensorit.....	30
3.2.1	Kamerat	32
3.2.3.	Laserlaitteet	33
3.2.4.	Tutka ja tutkahakupää	35
3.2.5.	Valonvahvistin	38
3.3.	Taistelulataus.....	39
3.2.1.	Ontelolataus.....	39
3.2.1.	Sirpalelataus	40
3.2.2.	Muut vaikutusmekanismit	42
3.2.3.	Sytytin	43
3.4.	Tietokone.....	45
4.	TAISTELUILMA-ALUSTEN KÄYTTÖ	47
4.1.	Käyttö nykypäivänä	47
4.2.	SWOT-Analyysi.....	48
4.2.1	Vahvuudet	49
4.2.2	Heikkoudet	50
4.2.3	Mahdollisuudet.....	51
4.2.4	Uhat.....	53
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	55
5.1.	Tulosten arviointi	55
5.2.	Tieteellisen kontribuution arviointi.....	59
5.3.	Lähdekritiikki	59
5.4.	Jatkotutkimus	60

MIEHITTÄMÄTTÖMÄT ILMA-ALUKSET TAISTELUSSA

1. JOHDANTO

Elektroniikan, optiikan, robotiikan ja akkuteknologian kehityksen tuloksena kyetään rakentamaan yhä pienempiä, suorituskykyisempiä ja halvempia asejärjestelmiä. Sodankäynnin kuvan muutos ja tulevaisuus näyttää etenevän kohti pienempiä joukkoja ja teknologian laajamittaista hyödyntämistä niin joukkojen varusteissa kuin käytettävässä aseistuksessa. Halu tappioiden minimoimiseen ja teknologian hyödynnettävyys on houkutellut valtiot kehittämään asejärjestelmiä, joiden käytöllä ei vaaranneta omien joukkojen henkiä.

Materiaalisen ja autonomiaan perustuvien ohjelmistojen teknologisen kehityksen myötä miehittämättömät ilma-alukset ovat saavuttaneet myös siviilimarkkinat. Ennen 2000-lukua miehittämättömät ilma-alukset olivat yksinomaan sotilasalan teknologiaa, ne olivat suurikokoisia ja kalliita sekä vaativat usein logistisilta järjestelyiltään paljon. Sotilaskäytössä olevat miehittämättömät ilma-alukset tarjoavat satelliittien ohella merkittävän resurssin tilannekuvan luontiin ja ne ovat viime vuosien aikana pystyneet kehittymään järjestelmiksi, jotka pystyvät kantamaan erilaisia hyötykuormia sekä aseita. [38]

Autonomisia piirteitä omaavat järjestelmät ovat taistelukentän tulevaisuutta. Eri tasoin itsenäiseen maalin paikannukseen, tunnistukseen ja vaikuttamiseen perustuvat aseet luovat käyttäjälleen suurta etua, sillä tällöin ihmisvoimaa ei sidota vaikuttamiseen ja henkilöstö on käytettävissä muihin tehtäviin. Lisäksi teknologisen kehityksen kiihtyessä ja teknologian halvennuksessa itsenäisesti toimivat asejärjestelmät ovat huomattavan kustannustehokas tapa vaikuttaa kohteisiin.

Tutkielma käsittelee autonomisia piirteitä omaavia asejärjestelmiä. Tarkoituksena on selvittää, mikä on nykytila tällaisten asejärjestelmien käytössä sekä luoda kuva niiden hyödynnettävyydestä lähitulevaisuuden taistelukentällä. Lisäksi selvitetään, kuinka aseiden autonomisuuden astetta voidaan mitata. Tutkimus keskittyy tarkastelemaan autonomisten asejärjestelmien tekniikkaa ja käyttöperiaatteita, mutta myös lainsäädännöllisiä esteitä ja rajoitteita sivutaan. Tutkielma liittyy puolustusvoimien vuoden 2016 päätutkimusalueisiin ja sillä on tarkoitus edesauttaa muuta aihealueen tutkimusta.

Vaanivat ja parveilevat asejärjestelmät ovat tekemässä tuloaan yhä vahvemmin osaksi nykyaikaista sodankäyntiä. Niiden kehittäminen on osa yleistä sodankuvan muutosta, jossa siirrytään yhä laajemmassa mittakaavassa kohti miehittämättömiä järjestelmiä, joiden käytöllä pyritään kustannustehokkuutteen ja ihmisresurssien kohdentamiseen muihin toimintoihin.

1.1. Tutkimuksen taustaa

Tässä tutkielmassa tarkastellaan ilmasta käsin vaikuttavia asejärjestelmiä, jotka toimivat vaanimis- tai parveiluperaatteella sekä omaavat jonkin asteen autonomisia ominaisuuksia. Tämän tyyppisiä asejärjestelmiä käytetään vastustajan ilmapuolustuksen tilannekuvan vaikeuttamiseen, ennalta tunnistettujen uhkien tuhoamiseen sekä oman ilmaoperaation tukena vastustajan puolustuskyvyn heikentämiseen. Kummankin tyyppisten asejärjestelmien käytöllä pyritään luomaan pitkäkestoinen ilmauhka kohdealueelle omien joukkojen toiminnan helpottamiseksi. Asejärjestelmien perustana on lentävän lavetin päälle rakennettu järjestelmä, jolla on kyky suorittaa toimintoja enemmän tai vähemmän itsenäisesti tuhotakseen kohteen. Raportin osana tarkastellaan eri autonomisuuden asteita osana asejärjestelmien toimintaa.

Vaanivat asejärjestelmät voidaan luokitella siten, että ne toimivat pitkäkestoisesti kohdealueella etsien sopivia maaleja ja sellaisen tunnistettuaan suorittavat vaikuttamisen. Maalin tunnistaminen ja vaikutuspäätöksen tekeminen voi tapahtua joko itsenäisesti tai operaattorin toimesta. Osa tämän kaltaisista asejärjestelmistä tuhoaa itsensä toimiessaan kohdetta vastaan. Parveilevien asejärjestelmien toimintaperiaate on hyvin samankaltainen, mutta niissä vaikuttavaan järjestelmään kuuluu useita pienempiä yksiköitä, jotka toteuttavat vaikuttamisen joko yhdessä tai erikseen kohteen luokituksen mukaisesti. Tällaisella asejärjestelmällä tilannekuvan luominen vaatii osajärjestelmien tietoisuuden toistensa sijainnista, tilannekuvasta sekä päätöksistä. Voidaan siis katsoa parveilevien asejärjestelmien hyödyntävän ”joukkoälyä” toiminnassaan.

1.2. Näkökulma ja rajaukset

Tutkimuksessa tarkastellaan autonomisia piirteitä omaavia asejärjestelmiä, jotka pyrkivät fyysiseen vaikutukseen taistelulatauksella. Autonomisella järjestelmällä tarkoitetaan itsenäiseen maalin tunnistukseen, -valintaan ja vaikuttamispäätöksen tekoon kykenevää järjestelmää. Tutkimus keskittyy ilmasta toimivien asejärjestelmien tarkasteluun, maalla ja vedessä toimivia järjestelmiä ei tutkielmassa käsitellä. Tavoitteena on selvittää järjestelmien teknisiä ominaisuuksia ja niiden luokittelu mykyajan taistelukentällä sekä hahmotella tulevaisuuden käytöperiaatteita. Kyseisen tyyppisiä järjestelmiä kutsutaan tässä tutkimuksessa taisteluilmaluksiksi (UCAV tai UCAR, Unmanned Combat Aerial Vehicle/Rotorcraft). Tutkimuksen järjestelmät toimivat siis lentävällä lavetilla, josta vaikuttaminen suoritetaan.

Tutkimuksen ulkopuolelle rajataan autonomiset järjestelmät, joilla ei pyritä fyysiseen vaikutamiseen. Järjestelmiä tarkastellaan teknisesti ja taktiikkaa käsitellään vain aseiden käyttöperiaatteiden hahmottamiseksi. Työ perustuu julkisiin lähteisiin ja täten turvaluokitustaso on julkinen. Tämä rajoittaa osittain järjestelmien tarkan numeerisen suorituskyvyn tarkastelua.

1.3. Tutkimusmenetelmä ja tutkimuskysymykset

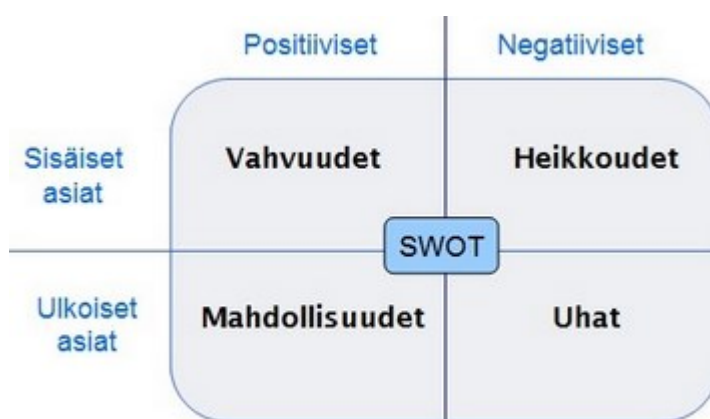
Tutkimuksessa käytetään kirjallisuustutkimusta aihepiirin perehtymiseen ja tarvittavan lähdemateriaalin etsintään. Kirjallisuustutkimuksella pyritään selventämään millaisia nykyajan ja lähitulevaisuuden autonomisia piirteitä omaavat asejärjestelmät ovat ja rajaamaan täsmällisemmin tutkittava aihealue. Kirjallisuustutkimuksella pyritään muodostamaan tutkijalle riittävä asiantuntemus ja pohjatiedot.

Aikaisemmin tuotettua tietoa etsitään, analysoidaan, luokitellaan ja ylipäänsä käytetään oman työn pohjana kirjallisuustutkimuksen menetelmällä. Tyypillisesti kirjallisuusselvitys on luettava esitys työn kannalta olennaisesta asiasta. Selvityksen lähteiden tulee olla ajantasaisia ja niitä tulee olla riittävästi. Tyypillinen lähdeaineisto käsittää standardeja, käsikirjoja ja tutkimusraportteja. Muodoltaan kirjallisuusselvitys on referaatti, mutta ei suoraa tekstikopiointia. [36] s.42

Kirjallisuusselvitys on välttämätön osuus kokeellisen tai soveltavan tutkimuksen esivaiheena, jonka tuloksena tutkimuksen kysymyksenasettelu tarkentuu ja kokeelliseen vaiheeseen saadaan lähtöarvot [36]s.42. Näin on myös tässä tutkimuksessa, kirjallisuusselvityksen keinoin hankitaan tiedot tutkittavista taistelujärjestelmistä.

Nelikenttäänalyysi (SWOT) on yksinkertainen ja yleisesti käytetty tarkasteltavan kohteen analysointimenetelmä. Analyysin avulla voidaan selvittää tarkasteltavan kohteen vahvuudet ja heikkoudet sekä tulevaisuuden mahdollisuudet ja uhat. Nelikenttärudikon avulla pystytään vaivattomasti arvioimaan kriittisesti tarkasteltavan kohteen ominaisuuksia [32].

Tarkasteltavan kohteen toimintaa voidaan arvioida monin eri tavoin. Keskeistä on aina selvittää sekä kohteen nykytila että sen tulevaisuuteen vaikuttavat asiat [32]. SWOT -analyysi on yksinkertainen tapa ryhmitellä kohteen toimintaan vaikuttavia lukuisia tekijöitä havainnolliseen nelikenttämutoon.



Kuva 1: SWOT-nelikenttä [32]

Nelikenttäänalyysi sisältää sekä kohteen vahvuuksien ja heikkouksien (nykytilanteen) että sen uhkien ja mahdollisuuksien (tulevaisuuden) analysoinnin. Yrityksen vahvuudet ovat niitä toimenpiteitä tai resursseja, joita kohde pystyy hyödyntämään. Heikkoudet puolestaan ovat tekijöitä, joita kohteen täytyy parantaa pystyäkseen toimimaan tehokkaasti [32]. Mahdollisimman tehokas toiminta on mahdollista kun kohteen tulevaa toimintaa koskevat uhat ja niiden torjumiseen käytössä olevat mahdollisuudet tunnistetaan.

Nelikenttäänalyysiä käytetään tässä tutkielmassa tarkastelemaan taisteluilma-alusten käytön mahdollisuuksia ja ulottuvuuksia nyt ja lähitulevaisuudessa. Analyysillä pyritään havainnollistamaan järjestelmien nykytilaa ja niiden käyttö osana nykyaikaista taistelua. Analyysi pyrkii vastaamaan tutkielman päätutkimuskysymykseen.

Päätutkimuskysymys:

Millaisia ovat autonomisia piirteitä omaavat taisteluilma-alukset?

Alatutkimuskysymykset:

1. Miten autonomiaa voidaan luokitella ja mitata taisteluilma-aluksissa?
2. Millaisia taisteluilma-alukset ovat tekniseltä rakenteeltaan?
3. Mihin taisteluilma-aluksia käytetään nykyajan taistelukentällä?

1.4. Keskeiset käsitteet

ARM (Anti-Radiation Missile) Tutkasäteilyyn hakeutuva ohjus

Autonomia on järjestelmän kyky havainnoida ympäristöään ja tehdä sen pohjalta itsenäisiä ratkaisuja toiminnastaan. Voidaan mitata eri asteikoilla.

CCD on valoherkkä kenno, joita käytetään muiden muassa video- ja digitaalikameroissa, kuvanlukijoissa ja kaukoputkissa valon tai infrapunasäteilyn muuntamiseen digitaalseksi signaaliksi.

DEW (Direct Energy Weapon) on ase, joka kohdistaa energiavirran johonkin suuntaan eri tavoin kuin ammuksena. Se siirtää energiaa kohteeseen halutulla tavalla.

Fly-by-wire on ohjausjärjestelmä, jossa käskyt ohjaimelta ohjattavalle laitteelle välittyvät sähköisesti ilman suoraa mekaanista tai hydraulista yhteyttä.

Hunter/killer on nimitys Yhdysvaltain ilmavoimien ja asevoimien projektille, jossa kehitetään taisteluilma-aluksia.

ISR (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) Tiedustelu, tarkkailu ja valvonta

LGB (Laser Guided Bomb) Laserohjattu pommi

Man-in-the-loop tarkoittaa järjestelmää, jossa ihminen on viime kädessä vastuussa päätöksistä ja kykenee keskeyttämään myös järjestelmän itsensä suorittaman toiminnon.

Parveileva asejärjestelmä on useista pienemmistä osajärjestelmistä koostuva asejärjestelmä, joka kykenee iskuihin kootusti tai hajautetusti usealta suunnalta.

PPI (Plan Position Indicator) on tutkan näyttötyyppi, jossa tutka sijoittuu keskelle ja sitä ympäröivää kehää kiertää antennin pyörimisen suuntaisesti säde joka maalaa havaitut kohteet näytölle.

SAR-tutka (Synthetic Aperture Radar) Suuren laskennallisen läpimitan tutka.

Taistelulataus on järjestelmän osa, joka suorittaa vaikuttamisen kohteeseen

UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle) Miehittämätön taistelukäyttöön tarkoitettu taisteluilma-alus. Kiinteäsiipinen

UCAR (Unmanned Combat Aerial Rotorcraft) Miehittämätön taistelukäyttöön tarkoitettu taisteluilma-alus. Pyöriväsiipinen

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Miehittämätön ilma-alus

Vaaniva asejärjestelmä on toiminta-alueellaan pitkäkestoisen uhan luova järjestelmä, joka iskee tunnistetun kohteen kimppuun sen tunnistettuaan ja luokiteltuaan.

Vaikuttaminen on suunnitelmallista vaikutusten tuottamista tavoitteiden ja päämäärien saavuttamiseksi. Suoralla vaikuttamisella tarkoitetaan toimintaa, jolla on välittömiä ja yleensä fyysisiä, helposti tunnistettavia seurauksia, kuten kohteen tuhoutuminen tulenkäytön seurauksena

1.5. Tutkimuksen rakenne

Tutkielma sisältää johdannon, kolme tutkimuskappaletta sekä johtopäätökset.

Ensimmäinen osa: Johdanto ja tausta

Tutkielman johdanto ja ensimmäinen kappale muodostaa perusteet tutkielman laatimiselle sekä esittelee tutkimusmenetelmät, tutkimuksen rajaukset ja tutkimuskysymykset.

Toinen osa: Autonominen asejärjestelmä

Ensimmäinen tutkimuskappale tarkastelee autonomiaa asejärjestelmissä. Miten sitä voidaan määritellä/luokitella, Millainen on tyypillisen järjestelmän rakenne ja käyttöperiaate? Kappaleessa pyritään luomaan yleiskuva järjestelmän toiminnasta. Esimerkeillä ilmennetään autonomia ominaisuuksia asejärjestelmässä.

Kolmas osa: Autonomisen asejärjestelmän tekninen rakenne

Osio keskittyy tarkastelemaan asejärjestelmien teknistä rakennetta. Asejärjestelmiä tarkastellaan niiden osajärjestelmien kuten sensoreiden, rungon ja taistelulatauksen avulla.

Neljäs osa: Autonomisten asejärjestelmien käyttö

Kolmas pääluku tarkastelee asejärjestelmien käyttöä nykyajan taistelukentällä. Lisäksi luku vastaa tutkielman pääkysymykseen SWOT-analyysin avulla.

Viides osa: Tutkimustulokset ja johtopäätökset

Päätöskappaleessa kootaan yhteen tutkielman tulokset ja analysoidaan niitä sekä selvitetään mahdolliset jatkotutkimusaiheet.

1.6. Aikaisempi tutkimus

Aihepiiriä on tutkittu aiemmin jonkin verran, mutta nykypäivänä se on yksi eniten pinnalla olevista tutkimusaiheista. Tämän johdosta miehittämättömien alusten ja lennokkien tutkimus onkin yksi puolustusvoimien kärkitutkimusalueista. Osa tutkimuksista sisältää hyvää tietoa, mutta useimpien tulokset ovat koonnoksia yleisten lähteiden tarjoamasta tiedosta.

- Miehittämättömät ilma-alukset, niiden kehitys sekä käyttö viimeaikaisissa sodissa (Jari Kananen, Pro Gradu –tutkielma, MPKK 2007)
- Miehittämättömän taisteluilma-aluksen maataistelukyky (Lauri Laitinen, Kandidaatin tutkielma, MPKK 2013)
- Tulenjohtotehtävän suorittaminen ja edellytykset Ranger-lentotiedusteluyksiköllä (TLL IV) (Janne Keskinen, Pro Gradu –tutkielma, MPKK 2008)
- Aseistettujen UAV:den käyttö Afganistanin sodassa (Olli Selander, Kandidaatin tutkielma, MPKK 2012)
- Miehittämätön taisteluilma-alus UCAV, teknologiakatsaus (Sami Puuperä, EUK-tutkielma, MPKK 2009)
- UAV-järjestelmät taistelualuksessa näkökulmana Laivue 2020 (Patrik Hämäläinen, YEK-diplomityö, 2017)

- Study on Armed Unmanned Aerial Vehicles (United Nations Publication, 2015)

Kirjallista aineistoa aihepiiristä on tuotettu todella paljon. Materiaalia lukiessa täytyy kuitenkin olla varovainen tiedon luotettavuuden suhteen, sillä monet artikkelit käsittelevät tämän tyyppisten asejärjestelmien käyttöä varsin tunnepohjaisesti ja ideologisesti lähestyen. Tekniseltä kannalta tarkasteltuna on vaikea julkisesti löytää tutkimuksia, joiden tarjoamaa tietoa voisi pitää eksaktina eikä suuntaa-antavana.

Löydettyistä lähteistä useimmat käsittelevät aseistamattomia lennokeita. Niiden tietoa voidaan hyödyntää osana tutkielman laatimista mutta suoria johtopäätöksiä aseistetun ja aseistamattoman lennokin välillä ei voi tehdä jo suuremman hyötykuorman johdosta. Kirjallisuus antaa kuitenkin hyvän yleiskuvan aihealueesta ja erinäisten tietokantojen sekä internetin avulla yleistietoja kykenee osittain tarkentamaan.

2. AUTONOMISET ASEJÄRJESTELMÄT

2.1. Autonomiset ominaisuudet asejärjestelmissä

Autonomialla tarkoitetaan laitteita tarkasteltaessa niiden kykyä sopeutua ympäristöönsä ja sen muuttuviin tekijöihin, ympäristön havainnointikykyä ja itsenäistä päätöksentekokykyä erilaisissa tilanteissa. Tutkielmassa esimerkkeinä käsiteltävät asejärjestelmät omaavat jonkinlaisen tason autonomian, mutta täydellisen autonomista järjestelmää ei tiettävästi ole vielä kyetty kehittämään.

Korkeamman tason autonomiaa tarvitaan järjestelmissä, jotka toteuttavat aikakriittisiä tehtäviä ja tilanteissa, joissa on vaara menettää yhteys maanpäälliseen datalinkkiasemaan [29] s.384. Aluksen autonomisuuden tason kasvaessa tiedonsiirron kapasiteettitarve aluksen ja operaattorin välillä vähenee. Kuitenkin korkeamman autonomian järjestelmät kommunikoivat toistensa kanssa, jotta ne kykenevät muodostamaan yhteisen tilannekuvan. Radiotaajuinen tiedonsiirto on säilynyt merkittävimpänä tiedonsiirtomenetelmänä kohteiden välillä [29] s 384.

Autonomista järjestelmää ei tule sekoittaa automaattiseen järjestelmään, jolla ei ole oppimis- ja sopeutumiskykyä. Autonomiset järjestelmät ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä, mutta kaiken päätöksenteon laskeminen koneen varaan etenkin tilanteissa, joissa saatetaan tappaa ihmisiä on herättänyt keskustelua tällaisten asejärjestelmien käytön oikeutuksesta.

Koneiden ja laitteiden autonomian eri tasoja voidaan luokitella monin eri perustein, sotilas-käytössä olevista miehittämättömistä järjestelmistä on yksi yleisesti käytetty luokittelumenetelmä kymmenportainen Yhdysvaltain ilmavoimien tutkimuskeskuksen laatima asteikko:

TASO	TASON KUVAUS	TILANNETIETO	PÄÄTÖKSENTEKO	KOMMUNIKAATIO
10	Täysin autonominen	Reaaliaikainen tilannetieto ja ympäristön seuranta	Täysin itsenäistä	Reaaliaikainen kommunikointi ja yhteistoiminta muiden toimijoiden kanssa
9	Usean laitteen taktiikan mukaisen suorituskyvyn optimointi	Muiden ilmatilan kohteiden havainnointi ja seuranta	Täysi kyky itsenäisyyteen ja optimointiin muiden alusten kanssa	Yhteinen toiminta muiden alusten kanssa.
8	Usean laitteen tehtävän mukaisen suorituskyvyn optimointi	Lähi-ilmatilan havainnointi ja seuranta	Jatkuva toiminnan kehittämisen tehtävän ja olosuhteiden mukaan	Rajoitettu yhteistyö muiden alusten kanssa.
7	Reaaliaikainen yksiköiden yhteistoiminta	Lähi-ilmatilan havainnointi Useiden uhkien havainnointi	Jatkuva lentosuunnitelman kehittäminen tehtävän ja sääolosuhteiden mukaan	Törmäyksen esto. Hierarkkinen yhteistyö.
6	Reaaliaikainen yksiköiden koordinaatio	Lähi-ilmatilan havainnointi Yksittäisten uhkien havainnointi	Lentosuunnitelman muuttaminen olosuhteiden mukaan	Törmäyksen esto Tieto muista ulkopuolelta
5	Tapahtumiin/virheisiin mukautuva laite	Rajoitettu ympäristötietoisuus täydennettynä ulkopuolelta annetulla datalla	Kykenee mukautumaan yleisimpiin vikoihin ja muutoksiin	Lentoratojen määrittäminen.
4	Karkea kyky vastata ennakoituihin tapahtumiin	Uhkavaroitus	Liiallisten vaikeuksien tunnistus ja päätöksen muuttaminen	Asennettujen lentoratojen mukailu
3	Pieni kyky vastata ympäristön tapahtumiin		Ongelman lähde. Rajoitettu optimoitu toiminta	Paluusuunnitelma lähtöpitteeseen Oman tilan tietoisuus
2	Esiohjelmoitua vaihtoehtoiset toimintamallit		Ongelman tunnistus. Toiminta ohjelmoidun mukaan	Operaattorin käskyjen noudattaminen
1	Suunnitelmallisen tehtävän keskeytys	Lennonohjaus, navigaatio	Esiohjelmoitu	Rajoittunutta välillä operaattori - alus
0	Kauko-ohjattu laite	Asento yms sensorit, mahdollinen kamera	Ei ole	Kauko-ohjain

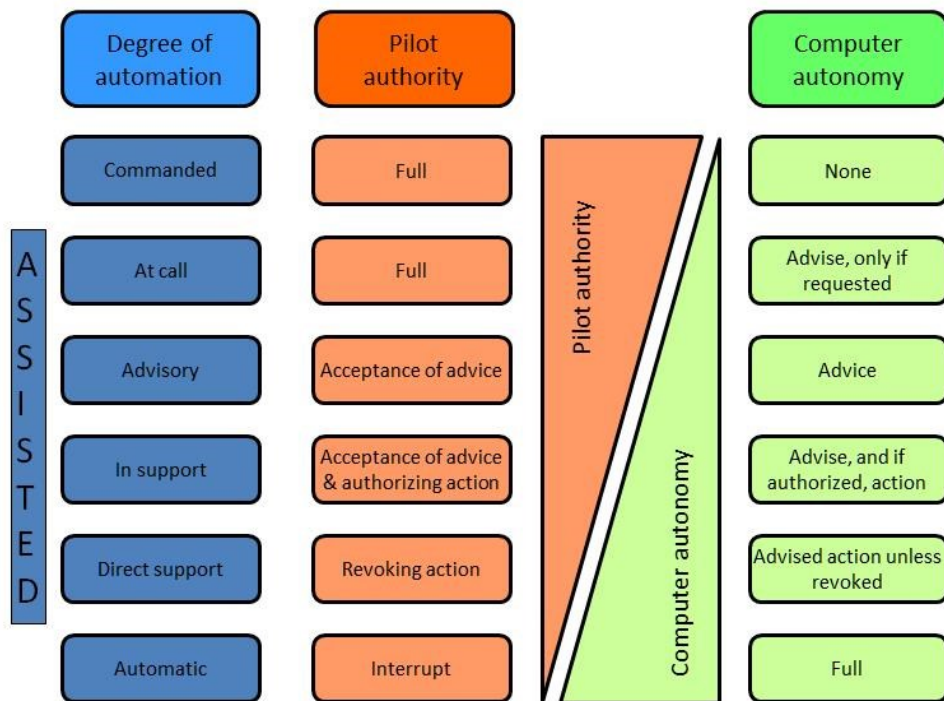
Taulukko 1: Autonomian tasot USAFRL:n luokituksen mukaan [5]

Yhdysvaltain ilmavoimien luokittelu jakaa siis autonomisuuden kolmeen keskeisimpään osa-alueeseen: laitteen tilannetietoisuuteen, analysointi/päätöksentekokykyyn ja kommunikointiin ja yhteistoimintaan muiden omien toimijoiden kanssa. Luokittelun mukaisesti nämä ominaisuudet laitteessa kasvavat mitä korkeamman autonomisen tason laite on kysymyksessä.

Tilannetieto tarkoittaa järjestelmän kykyä selvittää omaa ja ympäristönsä tilaa. Järjestelmän tilannetietoisuus on mahdollista luoda erilaisilla sensoreilla ja kommunikaatiolla muiden järjestelmien kanssa. Korkean tason laitteet kykenevät havainnoimaan omat ja vihollisen järjestelmät ilmatilassa ja tasojen laskiessa alemmilla tasoilla tilannetietoisuus on lähinnä uhkavaroitin. Yksinkertaisimmillaan järjestelmän tilannetieto on lähinnä operaattorin välittämiä käskyjä, joita laite ”tyhmästi” tottelee. Yksinkertaisimmillaan tällainen laite on esimerkiksi lasten kauko-ohjattava lennokka.

Päätöksenteko/analysointi mahdollistaa järjestelmän oman tilansa seuraamisen ja muutosten tekemisen toiminnassaan. On kyse sitten asejärjestelmillä vaikuttamisesta, lentoreitin muuttamisesta, tehtävän keskeyttämisestä tai useiden yksittäisten järjestelmien käytöstä yksittäistä kohdetta vastaan, korkeammalla hierarkian tasolla kone tekee päätökset yhä suuremmassa määrin itsenäisesti. Asejärjestelmien autonomia erityisesti tappavaa voimaa käytettäessä on ollut yleisesti kritisoinnin kohteena keskustelussa aseteknologian tulevaisuudesta.

Kommunikointi ja yhteistyö muiden järjestelmien välillä mahdollistaa esimerkiksi parveilevien aseiden ”joukkoälyn” yhteisen tilannekuvan ja toimivan tiedonsiirron johdosta. Korkean hierarkian laitteet kykenevät välittämään sekä vastaanottamaan dataa muilta toimijoilta ja täten muodostamaan tilannekuvansa laajemmalla kuin pelkästään omalta toimialueeltaan. Alhaisilla hierarkian tasoilla kommunikointi alkaa rajautua ennalta ohjelmoituihin reittimuutoksiin ja törmäyksien estoon ja yksinkertaisimmillaan se on vain operaattorin antamia komentoja alukselle.



Kuva 2: Autonomian taso ja tietokoneen sekä operaattorin päätöksenteko [44]

Järjestelmien autonomisuus voidaan siten määritellä niiden kyvyksi analysoida vallitsevia olosuhteita ja ympäristöä, kommunikaatiokyvyksi muiden järjestelmien kanssa ja kyvyksi tehdä niiden pohjalta päätöksiä seuraavasta toiminnastaan. Laitteiden autonomian tason kasvaessa operaattorin merkitys pienenee ja laitteiden oman tietokoneen vastaavasti kasvaa. Asejärjestelmän autonominen taso määräytyy pitkälti sen käyttöperiaatteen mukaan, vaikuttamiseen pyrkivillä taistelujärjestelmillä pyritään yleensä pitämään operaattori viimeisenä päätöksentekijänä (man-in-the-loop) mahdollisimman usein.

Toinen luokittelumenetelmä järjestelmän autonomisuudelle on Society of Automotive Engineers (SAE) – järjestön standardoitu kuusiportainen luokitusjärjestelmä [15]. Järjestelmän luokkia käytetään pääasiassa itseohjauvien autojen kehityksen apuna, mutta sitä voidaan verrata asejärjestelmien itsenäisyyttä mittaavaan Yhdysvaltain ilmavoimien luokitukseen yhtäläisyyksien tai erojen tunnistamiseksi. Luokitus kattaa ajoneuvojen ominaisuudet täysin kontrolloitavasta täysin autonomiseen ajojärjestelmään. Luokituksen mukaan ajoneuvot voidaan jakaa seuraaviin kuuteen luokkaan niiden sisältämien autonomisten ominaisuuksien perusteella [15]:

Taso 0: Kuljettaja on vastuussa kaikista ajamiseen ja laitteiden käyttöön liittyvistä päätöksistä. Ajoneuvolla ei ole minkäänlaista kykyä eikä mahdollisuutta tehdä päätöksiä ajamisen suhteen. Ainoa keino jolla järjestelmä voi vaikuttaa kuljettajan päätöksiin ovat huomautukset (varoitussvalot yms).

Taso 1: Lähes kaikki ajamiseen liittyvät päätökset ovat ajoneuvon kuljettajan käsissä. Ajamista helpottamassa voi kuitenkin olla erinäisiä järjestelmiä, jotka helpottavat kuljettajan työskentelyä tai suorittavat jopa pieniä itsenäisiä toimenpiteitä ajoneuvon liikuttelussa. Tällaisia järjestelmiä voivat olla esimerkiksi vakionopeudensäädin, kaistanunnistin tai automaattinen hätäjarrutus.

Taso 2: Tämän tason ajoneuvot erottuvat tasosta 1 sillä, että kaksi tai useampi ohjaamiseen liittyvää järjestelmää kykenevät toimimaan yhteistyössä. Standardin mukaan tällä ”mahdollistetaan kuljettajan hetkellinen mahdollisuus ottaa jalat pois polkimilta ja kädet ratilta”. Kuljettajalla on kuitenkin minä hyvänsä hetkensä valmius ottaa ajoneuvo hallintaansa. Tämän tason ajoneuvoissa esimerkiksi vakionopeudensäädin ja etäisyyden valvonta edellä ajavaan voivat toimia yhdistettyinä. Myös automaattisesti taskuparkin tekevä auto voidaan luokitella tähän kategoriaan.

Taso 3: Kuljettaja on yhä osallinen ajoneuvon liikkumisen määrittelyyn, mutta voi halutessaan siirtää kriittisten turvajärjestelmien hallinnan ajoneuvolle tietyissä liikenne- ja sääolosuhteissa. Vaikeat olosuhteet ovat kuljettajan vastuulla. Ero edelliseen kategoriaan on kuljettajan mahdollisuus siirtää hallinta ajoneuvolle pidemmiksi ajoiksi ja useammassa tilanteissa kuin aiemmin.

Taso 4: Ajoneuvo kykenee suorittamaan itsenäisiä ajotehtäviä kahden kohteen välillä, ilman kuljettajan puuttumista sen hallintalaitteisiin. Se kykenee havainnoimaan ympäristöään tarvittavilta osin ja tekemään ajoon liittyvät päätökset sen mukaisesti. Järjestelmä ei kuitenkaan osaa ennustaa odottamattomia tilanteita eli kuljettajan väliintulo on vielä mahdollista tarvittaessa.

Taso 5: Täysin autonominen ajoneuvo, joka suorittaa ajotehtävän kuljettajasta riippumatta tehden itsenäisesti kaikki päätökset, jotka vaikuttavat sen liikkumiseen. Verrattavissa ihmiseen kuljettajana eli huomioi ja ennakoi tilanteita, oppii ajaessaan ja sopeutuu erilaisiin ajoympäristöihin (kuiva, märkä, lumi, yms).

Luokitusjärjestelmään voidaan vertailla Yhdysvaltain ilmavoimien kategorioihin operaattorin/kuljettajan osallisuudessa käytettävän järjestelmän ominaisuuksien hallintaan. Järjestelmän autonomisuuden tasoa määriteltäessä on kuitenkin huomioitava taistelujärjestelmien mahdollisesti tappavaa voimaa käyttävät laitteet, joissa asejärjestelmän ja lavetin liikkumisen välinen autonomian taso voi olla huomattavan suuri. Tämä johtuu yleisestä tahtotilasta pitää tappavaa voimaa käyttävien aseiden hallinta mahdollisimman pitkälle ihmisen käsissä. Samoin autoteollisuudessa on käyty keskustelua miten itsenäinen ajoneuvo tulisi ohjelmoida, esimerkiksi tilanteessa jossa vaihtoehdot ovat ajaa joko ihmisen päälle tai alas sillalta.

2.2. Järjestelmien kehitys

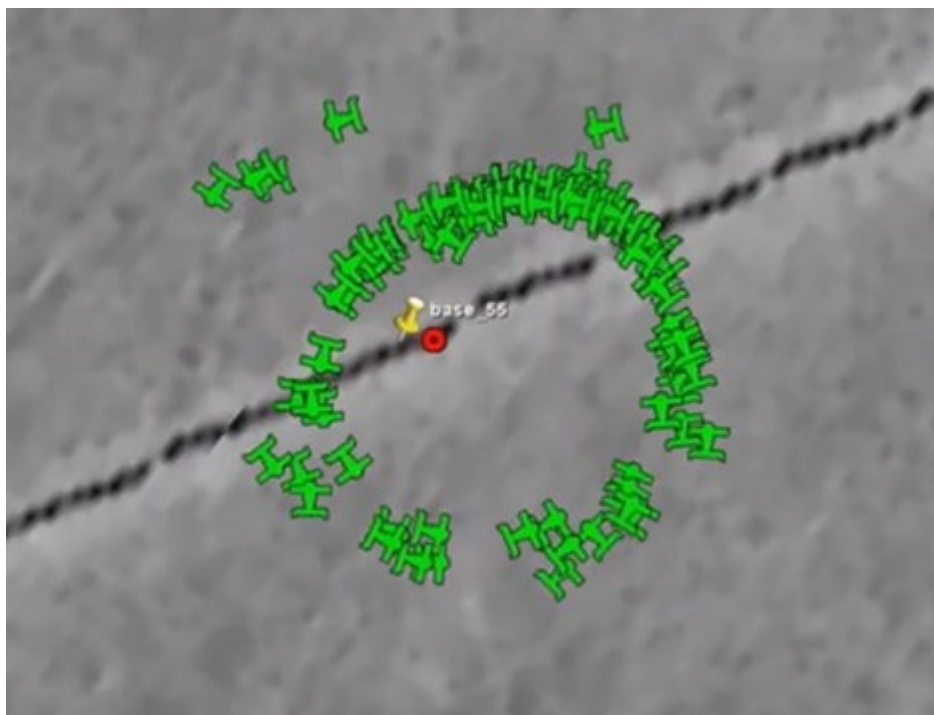
Autonomisista asejärjestelmistä suuremman yleisöön tietoisuuteen levinneistä ensimmäisiä olivat tutkaan hakeutuvat lennokkiohjukset ja miehittämättömät lennokit. Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on israelilainen Harpy, joka on tutkahakupäällä varustettu lennokit jossa maalin tunnistus ja vaikuttamispäätös on täysin automaattinen. Harpy sisältää taistelulatauksen, jonka se räjäyttää optimoidulla korkeudella tutkaherätteen aiheuttavista antenneista tuhoten kohteen ja itsensä [8]. Harpyn uudempi kehitysversio Harop sisältää myös elektro-optisen hakupään ja mahdollisuuden operaattorin suorittamalle aseiden ohjaukselle ja vaikuttamiselle [16]. Ensimmäisten tutkaan hakeutuvien asejärjestelmien heikkoutena on ollut maalin löytämisen vaikeus tutkien ollessa sammutettuna ja trendi näyttäisikin suuntavan useamman sensorin käyttöä asejärjestelmässä [20].

Toinen yleisesti tunnettu vaaniva asejärjestelmä on yhdysvaltalainen RQ-1A/B Predator on suurikokoisen sotilaallisen lennokin, sen ohjauksen ja satelliittitietoliikenteen sekä sen keräämän tiedon ja asejärjestelmien käytön muodostama järjestelmä. Predator-yksikkö sisältää neljä Predator-lennokkia ja hallintajärjestelmän (GCS, Ground Control Systems) ja Predator Primary Satellite Link (PPSL)-järjestelmän. Neljän lennokin operointi vaatii 55 henkilöä. Operaatiot kestävät jopa 24 tuntia [39]. Kone välittää operaattorille tilannekuvaa tv- (päivällä) tai infrapunakameralla (yöllä). Operaattori tekee päätökset vaikuttamisesta. Hyötykuormaa lennokit voi kantaa n. 500 kiloa, jona yleisesti käytetään AGM Hellfire -ohjuksia. Predatorin kehitysversio MQ-9 Reaper esitellään tarkemmin myöhemmässä luvussa esimerkkinä nykyaikaisesta taisteluilma-aluksesta.

Parveileva asejärjestelmä voi koostua esimerkiksi suuresta määrästä eri autonomisuuden asteilla operoivista lennokeista. Lennokkiparvi voi koostua eritasoisista lennokeista, joista yksi on niin sanottu master-lennokki ja loput ovat slave-lennokkeja. Master-lennokki on muita lennokkeja älykkäämpi, ja sen tehtävä on koordinoida ja käskyttää slave-lennokkeja. Nämä ovat älykkyydeltään eritasoisia ja ne ovat suunniteltu toimimaan eri tehtävissä.

Osaan lennokeista voidaan asentaa esimerkiksi laserosoittimia, jolla ne kuormittavat taistelupanssarivaunun omasuojajärjestelmää. Samalla ne voivat liikkua ennalta ohjelmoituja välietappeja pitkin, joissa ne osoittavat vaunua ennalta määrätyn ajan. Osa slave-lennokeista on varustettu räjähteellä ja niiden tehtävä on hyvin yksikertainen eli lentää master-lennokin käskemää vaunua päin. Nämä lennokit ovat kaikkein halvimpia ja ”tyhmimpiä”, eli niille annettavat tehtävät ovat joko ”seuraa” master-lennokkia tai ”lennä käskettyyn pisteeseen”, jossa tuhottava kohde on.

Slave-lennokeiden taistelulataus voi olla esimerkiksi ontelolataukseen tai räjähtämällä muovautuvaan ammukseen perustuva, jolloin lennokin ei tarvitse lentää täsmälleen oikealla korkeudella. Räjähdde voidaan räjäyttää myös radiosignaalilla, mutta tätä on kuitenkin suhteellisen helppo häiritä. Master-lennokin autonomisuuden asteen perusteella se suorittaa vaikutusmispäätöksen itsenäisesti tai operaattorin valtuuttamana.

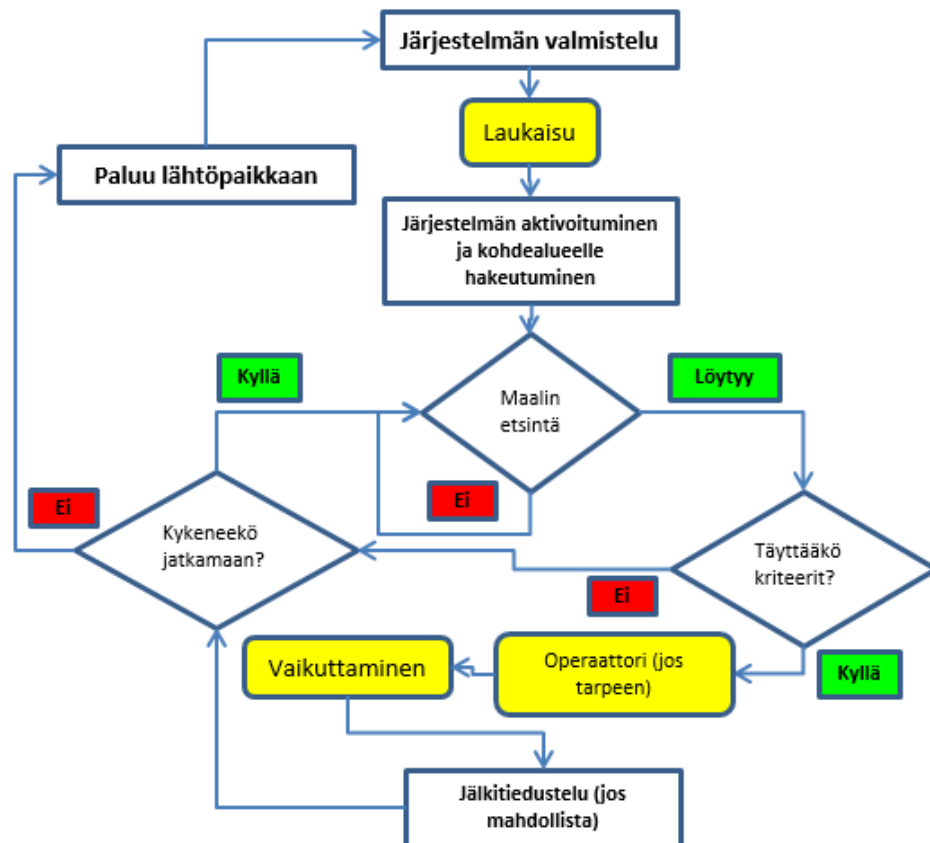


Kuva 3: Esimerkki näkymästä parven operaattorille [20]

2.3. Autonomisten ilma-asejärjestelmien käyttöperiaatteita

Käytettävän asejärjestelmän valinta perustuu muodostettuun uhkakuvaan ja haluttuun loppuasetelmaan. Yhteistä asejärjestelmien käytölle on pitkäaikaisen ilmauhkan luominen kohdealueelle. Vaanivia asejärjestelmiä käytetään tyypillisesti isompia ja suojatumpia kohteita vastaan ja parveilevat asejärjestelmät soveltuvat käytettäväksi kevyempiin kohteisiin. Asejärjestelmät laukaistaan ilmaan ja ne toimivat kohdealueella pitkäaikaisesti etsien tuhottavia kohteita. Mikäli vaikuttamista ei tehtävän aikana toteuteta, palaa järjestelmä lähtöalueelleen, jossa se voidaan täydentää uutta tehtävää varten.

Asejärjestelmän toiminta voidaan jakaa useaan vaiheeseen, jotka alkavat kohteen hakemisesta aina vaikuttamisen jälkeiseen jälkitiedusteluun. Yleisesti nimettyjä vaiheita ovat havaitseminen, paikantaminen, tunnistaminen, yksilöinti ja vaikuttaminen. Järjestelmän autonomisuuden tasosta nämä tapahtuvat joko itsenäisesti tai järjestelmää kontrolloivan operaattorin toimesta. Järjestelmän eri osa-alueiden (lento, paikannus, asejärjestelmien käyttö yms) itsenäisellä toimintakyvyllä voi olla myös suuria eroavaisuuksia, sillä erityisesti asejärjestelmien käyttö on haluttu pitää järjestelmän operaattorin hallussa.



Kuva 4: Taisteluilma-aluksen järjestelmän toiminta vuokaaviona

Asejärjestelmän havaitessa kohteen, se tunnistetaan joko järjestelmän tietokoneen tai operaattorin toimesta. Mikäli tunnistaminen tapahtuu automaattisesti, kohdetta verrataan tietokoneen sisältämään uhka/maalikirjastoon ja kohde priorisoidaan. Mikäli kohde on riittävän arvokas, suorittaa järjestelmä vaikuttamisen. Mikäli asejärjestelmän autonomian taso ei mahdollista itsenäistä maalin tunnistamista ja vaikuttamista siihen, tekee asejärjestelmää operoiva henkilö nämä päätökset ja antaa käskyt järjestelmälle. Vaikuttamisen jälkeen asejärjestelmä on joko tuhonnut itsensä (itsensä uhraavat järjestelmät), jatkaa partiointia ja uusien uhkien etsimistä tai palaa lähtöalueelle täydennettäväksi uuteen tehtävään.

Parveilevien ja vaanivien asejärjestelmien suurin hyöty on niiden kustannustehokkuudessa sekä henkilöstötappioiden vähentämisessä mahdollisen operaattorin toimiessa poissa välittömän uhan alta. Ilma-alusten ollessa miehittämättömiä, myös pitkään koulutetun lentohenkilöstön tarve vähenee ja resursseja voidaan suunnata muihin kohteisiin.

2.4. Järjestelmän osat

Autonomisia piirteitä omaavien asejärjestelmien peruseräilytteenä on toiminta ennalta selkeästi määriteltyä uhkaa vastaan. Tällainen voi olla esimerkiksi vihollisen ilmalavontatutka, etulinjan joukkojen välitön tulituki tai vaikeasti lähestyttävät kohteet. Järjestelmien alustana toimii miehittämätön ilma-alus, joihin muut osajärjestelmät on integroitu. Muut keskeisimmät osajärjestelmät ovat:

- Sensorit (maalin seuranta, paikannus, ja tunnistus)
- Tietokone
- Viestivälineet (kommunikointi operaattorin kanssa)
- Taistelulataus/asejärjestelmät kohteen tuhoamiseen
- Moottori

Järjestelmien alustana toimivan ilma-aluksen koko vaihtelee käyttötarkoituksen ja tarvittavan hyötykuorman mukaan. Pieniin kohteisiin vaikuttavat parveilevat asejärjestelmät voivat koostua jopa pienistä kaupallisista lennokeista, kun taas suojattuja kohteita vastaan raskailla aseilla vaikuttavat järjestelmät voivat hyvinkin olla normaalin hävittäjän kokoluokkaa. Yhteistä kummankin tyyppisille järjestelmille on alustan miehittämättömyys. Tämä merkitsee lennonohjauksen olevan joko automaattista tai maasta toimivan operaattorin suorittamaa.

Sensoreina toimivat erilaiset hakupäät ja kamerat. Niiden tarkoituksena on etsiä kohdealueelta kohteita, joita vastaan vaikuttaminen voidaan toteuttaa. Hakupää voi olla tutkaan hakeutuva, jolloin se tunnistaa kohteen lähettämän signaalin maalikirjastonsa perusteella. Toinen vaihtoehto on elektro-optinen sensori, jolloin maalin tunnistus perustuu sen muodon kontrastiin taustastaan. Tällaista sensoria käytettäessä tehdään yleensä vaikuttamistap päätös operaattorin toimesta kohteen oikean luokan varmentamiseksi. Asejärjestelmissä voidaan operaattorille välittää kohdealueen tilannekuvaa myös tv-, infrapuna- tai lämpökameran kuvana. Asejärjestelmän toimiessa vain kameran varassa maalin tunnistaminen ja vaikuttaminen tapahtuu aina operaattorin toimesta.

Vaikuttavana osana asejärjestelmissä on joko alustan itsensä sisältämä taistelulataus (itsensä uhraavat järjestelmät) tai erilliset aseet, joilla vaikuttaminen suoritetaan. Vaikuttava osa voidaan valita käyttökohteen mukaisesti. Esimerkiksi yksittäistä ihmistä vastaan vaikutettaessa riittää vaikuttavaksi lataukseksi hyvin pieni määrä räjähdettä kiinnitettynä lavettiin, kun taas vaikutettaessa raskaasti panssaroituihin kohteisiin (esimerkiksi taistelupanssarivaunut) tarvitaan erityisiä latauksia kuten panssarintorjuntaohjuksia. Taistelulatauksen vaikutus voi perustua paineen, sirpaloitumisen tai ontelopanoksen vaikutukseen tai näiden yhteisvaikutukseen.

2.5. Esimerkkejä autonomisesta järjestelmästä

Tämä alaluku tarkastelee esimerkkejä autonomisia ominaisuuksia sisältävistä järjestelmistä kolmen esimerkin kautta. Tarkasteltavat kohteet ovat valittu niiden toimintatavan ja autonomisuuden asteen perusteella. Harpy ja Perdix edustavat korkean tason autonomiaa, mutta niiden kyky vaikuttaa aseellisesti on rajattu hyvin tiukkaan (Perdixillä ei julkisten lähteiden mukaan ole). Reaper taas edustaa todella tulivoimaista järjestelmää, joka pidetään kuitenkin tiukasti ihmisen kontrollissa, pois lukien mahdolliset itsenäiset lentotehtävät.

2.5.1 IAI Harpy

IAI Harpy on israelilainen asejärjestelmä, joka on suunniteltu toimimaan tutkajärjestelmiä vastaan. Se koostuu lennokin päälle rakennetusta kokonaisuudesta, joka käsittää maalin haakuun ja tunnistukseen käytettävät sensorit, tietokoneen joka analysoi kohteen ja tekee päätöksen vaikuttamisesta sekä taistelulatauksesta, jolla kohde pyritään tuhoamaan.

Järjestelmän alustana toimii pienikokoinen lennokki, joka on suunniteltu toistuvasti käytettäväksi, mikäli yhdellä partioinnilla ei tuhoamistehtäviä suoriteta. Iskiessään kohteeseensa myös alusta tuhoutuu. Lennokki liitelee ohjelmoidulla partiointialueella saamansa reitin mukaisesti ja palaa laukaisupaikalleen toiminta-ajan päättyessä, mikäli parametrit täyttäviä kohteita ei ole löytynyt. Lennokin ohjaus on täysin autonomista.

Asejärjestelmän sensorina toimii passiivinen tutkahakupää. Se etsii ja lukkiutuu kohdetutkan pääkeilaan ja mahdollisuuksien mukaan myös sivukeilojen säteilyyn. Sen tulisi kyetä lukittautumaan myös tutkan sivukeilaan, koska jos se ei kykene ilmaisemaan kuin pääkeilan, sen hakeutumiseen tarvittava lähete ei ole voimassa kuin silloin, kun tutkan antenni osoittaa suoraan sitä kohti. [18] Ohjuksen herkkyys on laajakaistaisessa etsintätilassa (kun tutkan lähetystaajuutta ei tunneta, vaan järjestelmä etsii sitä) noin -60dBm [18]. Hakupäällä pyritään löytämään ja tunnistamaan halutut kohteet.

Vaikuttavana osana on 16 kilon taistelulataus korkeanopeuksista räjähdysainetta [17], joka todennäköisesti on ympäröity sirpaloituvalla kuorella. Räjähdyspaine ja muodostuvat sirpaleet tuhoavat yhteisvaikutuksella kohteen tutkajärjestelmän antennit ja suojauksesta riippuen myös koko kohteen. Taistelulataus räjäytetään herätesytyttimellä ja räjäytyskorkeus on optimoitu maksimaalisen tuhon aiheuttamiseksi antennille.

Pituus	2,7 m
Leveys	2,1 m
Moottori	1 × UEL AR731 (27,4 hv), 2-lapainen potkuri
Nopeus (max)	185 km/h
Kantama	300 km
Taistelulataus	16 kg taistelukärki
Paino	125 kg

Taulukko 2: IAI Harpyn perustiedot

Harpy on niin kutsuttu vaaniva asejärjestelmä, jonka tyypillisin käyttöperiaate on vastustajan ilmapuolustuksen lamauttaminen osana omien joukkojen suorittamaa ilmaoperaatiota. Asejärjestelmän tehokkuus perustuu vastustajan ilmatilannekuvan muodostamisen vaikeuttamiseen ja tulenkäytön estämiseen. Se laukaistaan alustalta partioimaan kohdealueella ja etsimään tutkajärjestelmiä, jotka saattaisivat aiheuttaa uhan omia joukkoja vastaan.

Kun lennokki havaitsee päälle kytketyn tutkan, se vertaa tutkan signaalia maalikirjastossaan oleviin tietoihin ja priorisoi maalin. Mikäli maali saa riittävän korkean arvion, lennokki syöksyy sitä kohti lähes pystysuoraan räjäyttäen itsensä maalin yläpuolella maksimoiden näin tutkan antenneihin kohdistuvan vahingon. Jos kohdetutka sammuttaa lähettimensä eikä lennokki löydä sitä, Harpy palaa partioimaan ilmatilaan. [20]

Harpy on täysin autonominen asejärjestelmä, jossa kaikki toiminnot ja päätökset laukaisun jälkeen tapahtuvat koneen itsensä tekeminä. Laite ei saa ohjauskomentoja operaattorilta, vaan maalien hakeminen, tunnistus ja vaikuttamispäätöksen tekeminen tapahtuu järjestelmän parametrien mukaisesti. Tämä mahdollistaa kustannustehokkaan ja pitkäkestoisen toiminnan operaatioalueella, eikä sido henkilöstöresursseja päivystys- tai vastaaviin tehtäviin.



Kuva 5: IAI Harpy [2]

Harpy on asejärjestelmänä suunniteltu toimimaan tilanteessa, jossa sen käyttäjällä on todennäköisesti ilmaherruus ja sitä käytetään tukijärjestelmänä muiden operaatioiden mahdollistamiseksi. Harpyn tehokkuus perustuu pitkäkestoiseen uhkaan, jolta tehokkain suojautuminen on lähetteen minimointi. Lisäksi aseiden autonomisuus lisää sen käyttöastetta ja vapauttaa henkilöstöä muihin tehtäviin.

Harpyn autonomisuus on todella korkealla tasolla, sillä se kykenee suorittamaan tehtävänsä itsenäisesti alusta loppuun (ml asevaikutus). Tosin taistelukärjen käyttö on rajattu tiukasti vain tiettyyn tutkaherätteeseen ja ihmisellä on optio tehtävän keskeyttämiseen (man-in-the-loop). Julkiset lähteet eivät kerro millä tavalla se kykenee kommunikointiin ilmatilan muiden omien järjestelmien kanssa. On perusteltua epäillä kuitenkin että laitteen autonomisuus ei siinä ole kovin korkealla tasolla, sillä se on itsensä tuhoava järjestelmä johon ei kannata sijoittaa osajärjestelmiin, joille ei ole välttämätöntä käyttöä. Jos arvioidaan USA:n ilmavoimien asteikolla asettuu Harpy noin 8 paikkeille.

2.5.2 MQ-9 Reaper

General Atomics MQ-9 Reaper on miehittämätön ilma-alus, joka on kykenee sekä kauko-ohjattuihin että itsenäisiin lentotehtäviin. Sen on kehittänyt General Atomics Aeronautical Systems pääasiassa Yhdysvaltain ilmavoimien käyttöön. Reaper kykenee sekä tiedustelu- ja valvontatehtäviin että vaikuttamiseen vihollista vastaan. Se on varustettavissa tehtäväkohtaisesti [35]. Reaperia voidaan käyttää näiden kahden päätehtävän lisäksi esimerkiksi lähitulituksen, täsmäiskuihin, kuljetusten suojaamiseen ja kohteiden laservalaisuun muille järjestelmille [35]. Reaper on kehitysversio aiemmasta General Atomics MQ-1 Predator – asejärjestelmästä ja sitä voidaan ohjata samalla maanpäällisellä järjestelmällä. Se kykenee 14 tunnin yhtäjaksoiseen toimintaan täydellä kuormalla [7].

Tehtävään valmistautuessa tavoitteena on saada järjestelmä ilmaan kahdeksassa tunnissa paikalle saapumisesta. Järjestelmän liikuttaminen paikasta toiseen tapahtuu raskailla kuljetuskoneilla ja on aikaa vievää. [22] Lentoon lähettämisen valmistelun ja järjestelmän pystyttämisen toteuttamiseen on oma tukiryhmänsä. Järjestelmän ollessa toiminnassa ja lennossa sitä ohjaa kaksi operaattoria, joista toinen vastaa lennonohjauksesta ja toinen sensorien ja asejärjestelmien käytöstä [2]. Operaattoreiden ei ole välttämätöntä olla itse taistelualueella vaan asejärjestelmää voidaan käyttää jopa toiselta mantereelta käsin. Näin on tehty esimerkiksi Afganistanin ja Irakin sodissa, kun jossain tehtävissä operoiva henkilöstö on ollut Las Vegasissa Yhdysvalloissa [33]. Joissain lähteissä sanotaan että viime aikoina kehityksen alla ollut itsenäinen lentoonlähtö- ja laskeutumiskyky olisi saatu käyttöön [45].

Kommunikointi operaattoreiden ja lennokin välillä tapahtuu satelliittiyhteyden välityksellä, NATO:n taajuusalueella C (500-1000MHz) [45]. Järjestelmän sensorit tuottavat tietoa operaattoreille päätöksenteon tueksi. Lennokki on varustettavissa sensoreiden osalta tehtäväkohtaisesti. Perustana on Multi-Spectral Targeting System - niminen kokonaisuus joka sisältää seuraavat osat [35]:

- Kamerate (lämpö, päivänvalo, valonvahvistin)
- Laseretäisyysmittari
- Laservalaisin
- SAR-tutka

Operaattorit voivat valita käytettävän sensorin tai yhdistää useamman tuottamaa dataa olosuhteiden mukaisesti [35]. Lisäksi järjestelmää voidaan käyttää maalinosoitukseen muille asejärjestelmille.

MQ-9 Reaper

Yleiskuvaus	Kauko-ohjattava hunter/killer asejärjestelmä
Valmistaja	General Atomics Aeronautical Systems, Inc
Moottori	Honeywell TPE331-10DG potkuriturbiini
Työntövoima	900 hv (maksimi)
Siipiväli	20,1 m
Pituus	11m
Korkeus	3,8m
Paino	2223kg (tyhjäpaino)
Maksimipaino	4760 kg
Polttoainetilavuus	2279 l
Hyötykuorma	1701 kg
Nopeus	370 km/h
Toimintasäde (aika)	1850 km (42h)
Maksimikorkeus	15 240 m
Aseistus	Valittavissa tehtäväkohtaisesti
Miehistö (kauko-ohjaajat)	2 (pilotti ja sensorioperaattori)
Hinta	53,5 miljoonaa dollaria
Operointikyky	Alkaen syyskuu 2007

Taulukko 3: MQ-9 Reaper yleistiedot [35]

MQ-9 Reaper on asejärjestelmiensä osalta varustettavissa tehtäväkohtaisesti. Pääosa operaatioissa käytetystä aseistuksesta on ollut erilaisia täsmäaseita. Ohjuksista järjestelmään on ollut kiinnitettynä ainakin:

- Laserohjattu pommi GBU-12 Paveway II,
- Ajoneuvoja ja tärkeitä henkilökohteita vastaan AGM-114 Hellfire II
- Ilmataisteluun AIM-9 Sidewinder
- Täsmäpommi GBU-38 JDAM

Koneen aseistus kiinnitetään sen alapuolella oleviin kiskoihin, joita on kuusi kappaletta. Samoihin kiinnityspisteisiin laitetaan myös mahdolliset lisäpolttoainetankit, mikä rajoittaa järjestelmän kokonaisasemäärää [45].



Kuva 5: MQ-9 Reaper aseistettuna [7]

Autonomian kannalta tarkasteltuna MQ-9 Reaper on kehittynyt järjestelmä, jolla on valmiuksia toimia hyvinkin itsenäisesti (asevaikutusta lukuunottamatta). Mikäli edellämainittu itsenäinen nousu- ja laskeutumiskyky on saatu operatiiviseen käyttöön, kykenee se suorittamaan täysin itsenäisen lentotehtävän syötteen saatuaan. Kuitenkin operaattoreilla on vahva rooli järjestelmän käytössä ja sen monipuolisuus niin fyysisesti vaikuttavana elementtinä kuin tiedustelutehtävissä vaatii heidän jatkuvaa osallistumistaan toimintaan. Myöskin aseilla vaikuttaminen on rajattu pois järjestelmän omista mahdollisuuksista. Tarkasteltaessa autonomian tasoa USARFL:n luokituksen mukaan se asettuu noin tasolle 6-7 edelliset seikat huomioiden.

2.5.3. Perdix

Perdix-lennokki on alunperin Massachusetts Institute of Technologyn opiskelijoiden kehittämä ja rakentama pienikokoinen lennokka [25]. Ne ovat autonomisia ja niitä voidaan käyttää matalalta lentokorkeudelta suoritettaviin tiedustelu- ja tarkkailu- ja muihin tehtäviin. Ne voidaan laukaista lentoon ilmasta, mereltä tai maasta ja ne kykenevät muodostamaan suuria tai pieniä parvia saamansa tehtävän toteuttamiseksi [27]. Kone otettiin jatkokehitykseen MIT:lta Yhdysvaltain Strategic Capabilities Office (SCO). Koneen päivitys on ollut ahkeraa ja nykyinen sukupolvi edustaa jo kuudetta kehitysversiona [25]. Kone on testattu useaan otteeseen erityisesti parvikäyttäytymisen osalta, mutta SCO ei ole julkistanut mihin tehtäviin se lopulta pyritään saamaan käyttöön.

Laitetta testattiin menestyksekkäästi lokakuussa 2016, kun kolmesta F/A-18 Super Hornet – koneesta pudotettiin yhteensä 103 lennokkia. Lennokit kestävät pudotuksen liikkuvasta koneesta aina Mach 0,6 nopeuteen asti. Testin tarkoituksena oli tutkia parveilun hyödyntämää ryhmä-älyä ja kollektiivista päätöksentekokykyä [27][25][21][11]

Yhdysvaltain puolustusministeriön julkaisemalla videolla kokeesta näkyy, kuinka lennokit ryhmittyvät pudotuksen jälkeen ja suorittavat niille ohjelmoituja tehtäviä hyödyntäen ryhmä-älyä. Perdixiin ei ole asennettu valmiita toimintaohjeita tehtävän suorittamiseksi, vaan kaikki parven lennokit ovat toisiinsa yhteydessä ja parvi toimii parhaaksi näkemällään tavalla saamansa tehtävän toteuttamiseksi. Parven toiminta on kuitenkin ennustettavissa annettujen tehtävämäärittelyjen takia. Parvi ei myöskään toimi Master-Slave periaatteella, eli sillä ei ole johtajaa vaan jokainen lennokka on samanarvoinen yksilö parven sisällä. Tämä tekee sen myös tappionkestäväksi ja se kykenee poistamaan sekä ottamaan uusia jäseniä tehtävän aikana [27][25][21][11].



Kuva 6: Perdix-lennokki [21]

Vaikka Perdix ei kirjaimellisesti katsoen taisteluilma-alus olekaan niin se on hyvä esimerkki siitä, kuinka tulevaisuuden sodankäynnissä koneet saattavat kyetä suorittamaan saamiaan tehtäviä täysin itsenäisesti ja hyödyntää toiminnassaan joukkoälyä. Perdix-parven varustaminen taistelukelpoiseksi esimerkiksi häirintälähettimillä tai pienillä räjähteillä ei myöskään ole kovinkaan monimutkainen operaatio. Autonomian tasolla tarkasteltuna se on korkean luokan järjestelmä ja asettuu noin tasolle 8,5-9.

PERDIX

Pituus	16,5 cm
Leveys	30 cm
Potkuri	6,5 cm
Paino	290 g
Toiminta-aika	20 min
Nopeus	40-60 solmua

Taulukko 4: Perdix-lennokin yleistiedot [27]

3. JÄRJESTELMÄN RAKENNE

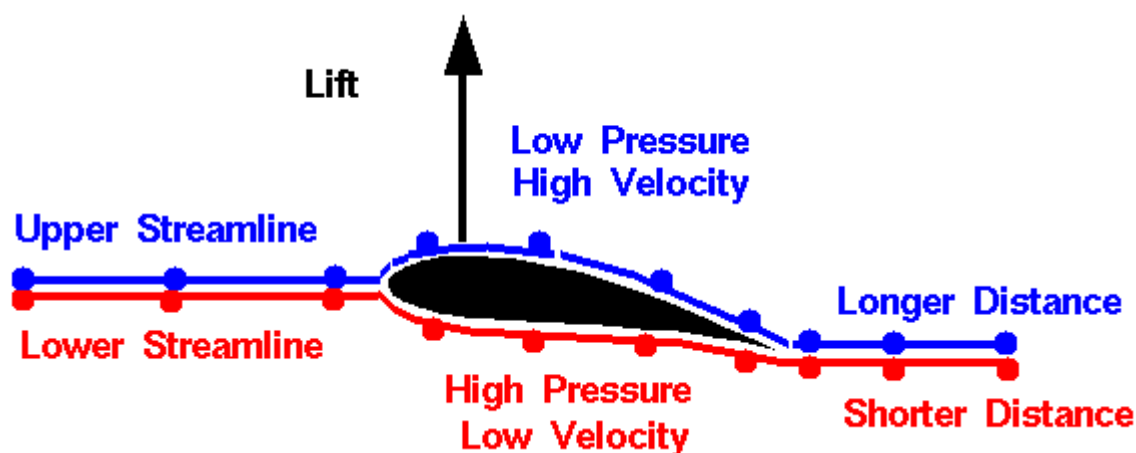
Taisteluilma-alus rakentuu sensoreista ja osajärjestelmistä, jotka on integroitu lavettiin. Kokonaisuus on useimmiten rakennettavissa tehtävänmukaisesti. Järjestelmien sisältämissä osajärjestelmissä on eroja ja lavetin koosta riippuen niitä voidaan sisällyttää kokonaisuuteen joko erittäin monipuolisesti tai tietyn tyyppiseen tehtävään kohdennettuna. Tehtäväkohtaisella varustelulla voidaan myös minimoida taloudelliset tappiot menetettäessä järjestelmä taistelussa.

3.1. Lavetti

Nykyaikainen taisteluilma-alus on rakennettu lentävän lavetin päälle. Lavetin tarkoituksena on kuljettaa tiedustelu-, tarkkailu- ja asejärjestelmät ilmateitse taistelukentälle ja mahdollistaa niiden suorituskyvyn käyttö omien joukkojen hyväksi. Lavetin koko voi olla hyvinkin pieni (kaupallinen quadrokopteri) tai miehitetyn hävittäjän kokoluokkaa (MQ-9 Reaper). Olennaista lavetin toiminnalla on sen kyky tuottaa tarvittava nostovoima muiden järjestelmien ilmaan saamiseksi ja siellä pitämiseksi. Tämä toteutetaan joko kiinteillä siivillä (UCAV) tai pyörivillä roottoreilla (UCAR).

Kiinteäsiipisen miehittämättömän taisteluilma-aluksen lentokyky perustuu moottoriin, joka tuottaa lavetille tarvittavan työntövoiman sekä rungon ja siipien muotoiluun, jolla saadaan aikaan tarvittava nostovoima lavetin nostamiseksi ilmaan.

Nostovoima syntyy paine-erosta, kun siiven yläpinnalle muodostuu alipaine ja siiven alapinnalle ylipaine. Siiven yläpinnalla oleva alipaine muodostaa yleensä merkittävimmän osan koko nostovoimasta. Paine ei ole tasainen siiven pinnalla, vaan se on suurimmillaan siiven etureunassa ja pienenee siirryttäessä takareunaa kohti. Nostovoiman suuruus on painejakauma kerrottuna siiven tehollisella pinta-alalla eli Nostovoiman suuruus on painejakauma kerrottuna siiven tehollisella pinta-alalla eli $F = p A$ [24].



Kuva 6: Nostovoiman syntyminen [24]

Mitä suurempi ylipaine siiven alapuolella vallitsee, sitä enemmän kone työntyy kohti alipainetta. Siipien kulmaa voidaan vaihtaa niin, että ne muuttavat painetta ja saavat koneen joko nousemaan korkeammalle tai laskeutumaan. Nostovoiman suuruuteen vaikuttavat monet seikat, muun muassa lentonopeus ja -korkeus, siiven ja ilmapinnan välinen kohtauskulma sekä siiven koko, muoto ja puhtaus. Lentokoneen ohjaamista varten taas tarvitaan siipiin liitettyjä laippoja, lentojarruja ja siivekkeitä.

Sakkaukseksi kutsutaan ilmiötä, jossa ilmapinta irtaantuu siiven pinnalta ja osa nostovoimasta menetetään. Sakkaus lisää aina huomattavasti vastusta josta käytännössä yleensä seuraa lentonopeuden aleneminen [13]. Pääosa menetetyistä nostovoimasta on seurausta tästä. Sakkauksen torjuminen edellyttää kohtauskulman pienentämistä. Sakkaus saattaa tulla äkillisenä, sillä sitä edeltää yleensä tilanne, jolloin nostovoima on ollut suurimmillaan [13].

Itsenäisesti ohjautuvien alusten kohdalla lentokyvyn suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös nämä poikkeustilanteet ja järjestelmän ohjausyksikön kyky reagoida niihin. Korkean tason autonomiset järjestelmät, jotka kykenevät itsenäisiin lentotehtäviin tarvitsevat siis hyvin yksityiskohtaisen ohjelmoinnin tehtävän onnistumiseksi.

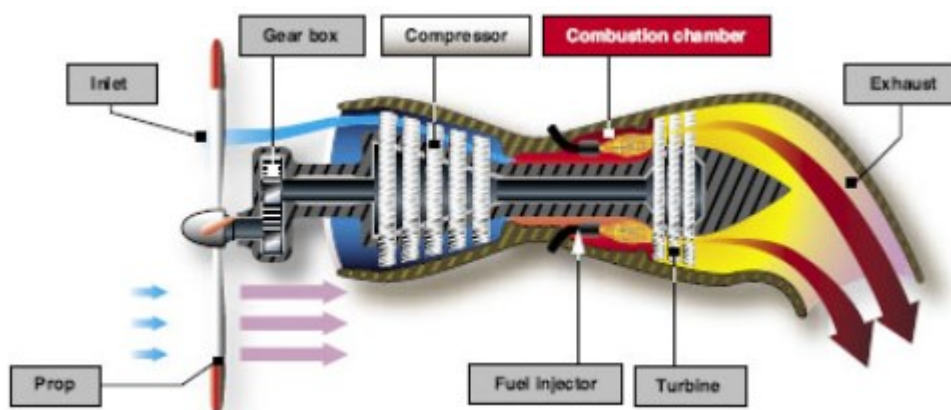
Tarvittava työntövoima kiinteäsiipiselle lavetille saadaan sen moottorista. Toteutustapa on yleensä valittu lavetin painon ja siitä seuraavan moottorin tehontarpeen mukaan. Tärkeä ominaisuus taisteluilma-aluksen moottorille on myös vähäinen polttoaineenkulutus [3]. Pienet lavetit ovat tyypillisesti varustettu sähkö- tai polttomoottorikäyttöisellä potkurimoottorilla ja suuret potkuriturbiinilla.



Kuva 7: Kiineäsiipinen ja pyöriväsiipinen lavetti [48][28]

Potkuri on siipipyörä, joka muuttaa lapojensa pyörivän liikkeen väliaineen nopeutta kasvattamalla työntövoimaksi. Potkurin voimanlähteenä on moottori. Potkuri luo työntövoimansa kuten lentokoneen siipi ja samalla syntyy vastusmomentti, jonka moottorin tehon tulee ylittää. Vedessä potkurin ongelmiin kuuluvat mm. kavitaatio. Ilmassa lentokonepotkureiden ongelma oli lavan kärjen suuret virtausnopeudet, joissa syntyy tiivistysaaltoja ja virtauksen irtoamista ja sitä kautta värähtelyjä. [42]

Potkuriturbiini on reaktiomoottori, jonka toiminta perustuu nopeasti virtaavaan ilmaan, joka tuottaa työntövoimaa mekaniikan kolmannen peruslain mukaisesti. Suurin ero pääosin samalla toimintaperiaatteella toimivaan suihkumoottoriin on tuotettavan voiman käyttäminen pääosin ulkoisen ja moottoria suuremman potkurin pyörittämiseen työntövoiman saavuttamiseksi. Suihkumoottorissa ilma ohjataan kokonaisuudessaan moottorin sisään [23].



Kuva 8: Potkuriturbiini [12]

Tämän tyyppisessä moottorissa potkurin pyörivä liike työntää ilmaa turbiinille, jossa sen paine kasvaa pyörivän ahtimen pakatessa sitä ja ympäröivän tilavuuden kaventuessa. Sytytyskammiossa ilmaan sekoitetaan polttoainetta ja se syttyy jolloin sen lämpötila sekä tilavuus kasvavat voimakkaasti. Tämä energia purkautuu kohti moottorin ulostuloa, jolloin siitä otetaan talteen energiaa monipyöräisen turbiinin avulla. Energialla pyöritetään potkuria ja ahdinta ja reaktio jatkuu. Suurin osa työntövoimasta tulee potkurista, sillä pakokaasujen nopeus on suhteellisen matala turbiinien jälkeen [23][12].

Pyöriväsiipisessä ilma-aluksessa nostovoima tuotetaan yhdellä tai useammalla vaakatasossa pyörivällä roottorilla, joissa on kiinnitettynä eri määrä siiven muotoilua muistuttavia lapoja. Erona kiinteäsiipiseen lavettiin se kykenee pystysuoraan nousuun ja laskeutumiseen sekä leijumaan paikallaan. Nostovoiman tuoton fysikaalinen ilmiö on sama kummallakin tyyppillä. Roottorin avulla liikkuminen perustuu lapakulmien muuttamiseen.

Lienee yleisimmässä roottorisovelluksessa eli yksiroottorisessa helikopterissa ongelmaksi muodostuu roottorin pyörimistä vastaan kohdistuva voima, joka pitää kumota erillisellä pienemmällä roottorilla, joka pyörii pyrstön päässä kohtisuoraan. Ongelma saadaan eliminoitu useamproottorisissa sovellutuksissa pyörittämällä niitä eri suuntiin, jolloin voimat kumoavat toisensa ja kiertävää vaikutusta ei synny [1].

Pyöriväsiipisiä taisteluilma-aluksia ei julkisten lähteiden mukaan ole tällä hetkellä operatiivisessa käytössä. Erilaisiin kaupallisiin lennokeihin pohjautuvat kokeilut ovat osoittaneet, että tulevaisuudessa etenkin parveiluperiaatteella toimivat aseistetut pienlennokit voivat osoittautua käyttökelpoisiksi [25]. Yhdysvaltain armeija on ollut kehittämässä miehittämätöntä taisteluhelikopteria, jolta odotettiin ensimmäistä demoesiintymistä vuoden 2017 aikana ja tulevan asteittain autonomisempana tuotantoon seuraavien vuosikymmenien aikana [6].

3.2. Sensorit

Sensorijärjestelmät perustuvat maalin herätteen, eli maalin lähettämän tai maalista heijastuvan fysikaalisen suureen vastaanottoon ja tulkintaan. Mitattava suure voi olla mekaaninen aaltoliike (seismiset ja akustiset anturit), paine, kemiallinen emissio, magneettisuus tai kohteesta tuleva sähkömagneettinen säteily. Sensorit voidaan jakaa luokkiin eri perustein, kuten: [18]s.187

- Millä spektrin alueella sensori toimii (RF, infrapuna, näkyvä valo, ultravioletti)
- Mihin sensorilta saatavaa tietoa käytetään (valvonta, tiedustelu, maalin paikannus, maaliin hakeutuminen, varoitus)
- Perustuuko toiminta sensorin itse lähettämään säteilyyn, vaiko vain vastaanotamaan säteilyyn (aktiiviset ja passiiviset sensorit)
- Muodostaako sensori kohteesta tulkittavissa olevan kuvan vaiko ilmaiseeko vain kohteen olemassaolon tai sijainnin (kuvaava ja ei-kuvaava sensori)
- Muodostaako sensori kuvaa muutamalla sensorielementillä pyyhkäisemällä (scanning) vaiko tuijottamalla yhtäaikaaisesti koko kohdealuetta (staring)
- Mille alustalle sensori on asennettu (ajoneuvo/kontti, lennokki, lentokone, satelliitti yms.)

Sensorin toiminta perustuu joko maalin itsensä säteilemään tai maalista heijastuvaan säteilyyn. Kaikki taistelukentän kohteet heijastavat osan niihin osuvasta säteilystä. Tämä säteily voi tulla luonnosta, kuten auringosta, kuusta tai tähtitaivaalta, tai se voi olla peräisin sensorista itsestään (aktiiviset sensorit) tai muista sotilas- tai siviilijärjestelmistä, kuten tutkista tai yleisradiolähetyksistä. [18]s.187

Taisteluilma-aluksissa sensoreiden tehtävän on tuottaa dataa, jonka perusteella tehdään päätös mahdollisesta tunnistettuun kohteeseen vaikuttamisesta. Järjestelmän autonomisuuden tasosta riippuen tuotetun datan perusteella joko järjestelmän operaattori tai järjestelmä itse suorittaa vaikuttamisen kohteeseen kun tarvittavat parametrit täyttyvät. Mikäli kyseessä on tiedustelu-tehtävä, voi järjestelmä raportoida vain tietyt parametrit täyttävät havainnot eteenpäin operaattoreilleen. Tässä alaluvussa käsitellään autonomisista järjestelmistä yleisesti löytyviä sensoreita, joita on asennettu myös esimerkkijärjestelminä toimiviin taisteluilma-aluksiin.

Sensoreiden toiminta voidaan jakaa useaan vaiheeseen, joita kutakin varten voi sensorijärjestelmässä voi olla oma sensorinsa tai sama sensorivoi siirtyä toimintatilasta toiseen. Seuraavassa sensorit on jaettu viiteen jaksoon: [18]s.188

1. Maalin havaitseminen (detecting)
2. Maalin paikantaminen (location)
3. Maalin tunnistaminen (recognition)
4. Maalin yksilöinti (identification)
5. Maalin seuranta (tracking)

Asejärjestelmän autonomisuuden asteen perusteella se kykenee edelle esitettyihin toimenpiteisiin joko automaattisesti tai ohjattuna. Lisäksi taisteluilma-alusten osalta voidaan kuudenneksi vaiheeksi ottaa vaikuttaminen, joka tapahtuu joko järjestelmän tai operaattorin päätöksellä.

3.2.1 Kamerate

Kameroiden tehtävä taisteluilma-aluksissa on tuottaa kuvaa operaattoreille taistelukentän tarkkailemiseksi, maalien ja kohteiden tunnistamiseksi sekä vaikutuspäätösten tekemisen tueksi. Kamerate ovat passiivisia sensoreita ja niiden tuottama data perustuu kohteen itse lähettämän tai siitä heijastuneen säteilyn havainnoimiseen.

Lämpökamera on lämpösäteilyn vastaanotin. Se mittaa kuvauskohteen pinnasta luonnostaan lähtevää lämpösäteilyä. Lämpökameran ilmaisin muuttaa kohteen lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostetaan digitaalisesti reaaliajassa. Lämpökameraa käytetään ensisijaisesti pintalämpötilajakaumien havainnollistamiseen. Jäähdytettyjen matriisien toimintalämpötila on noin -200 astetta celsiusta. Jäähdytys toteutetaan tavallisesti heliumkiertopumpulla. Jäähdyttämättömien matriisien pitempi vasteaika ei anna mahdollisuutta kuvata erittäin nopeita lämpöilmiöitä kuten jäähdytettyjen matriisien. [14]

Ilmaisinmateriaalina käytetään samantyyppistä materiaalia, jota käytetään sähkövastusten valmistamisessa. Vanhemmissa, yhden jäähdytetyn ilmaisimen kameroissa ilmaisin on myös jäähdytettävä lähes -200 asteeseen. Lämpökameran ilmaisin on tässä tapauksessa tavallisesti alkuaineseosta, esim. HgCdTe. Tämän tyyppisissä lämpökameroissa käytetään mekaanista juovaskannetta, joka ”pyyhkii” mittauskohteen pysty- ja vaakasuunnassa. Tänä päivänä jäähdyttämättömän matriisi-ilmaisimen kamerate ovat yleisimmin käytössä. [14]

Sotilaskäytössä lämpökameralla pyritään löytämään ympäristöstä infrapuna- ja näköalueen lämpöerähtämiensä perusteella poikkeavat kohteet. Tyypillisesti ihmisen ruumiinlämpö sekä erilaiset polttomootorikäyttöiset ajoneuvot aiheuttavat lämpöjäljen, jonka perusteella on helppo erotella kameran tuottaman kuvan perusteella haluttu kohde ympäristöstään.

Suojautuminen lämpökameralta perustuu yleensä suoran näköyhteyden estämiseen. Lämpölähteen erottuessa yleensä hyvinkin selvästi taustasta luonnonolosuhteissa on helpoin keino paljastumisen välttämiseen estää kameran näkyvyys kohteeseen. Mitä paksumpi kerros materiaalia havaitsijan ja kohteen väliin saadaan, sen parempi peitto.

Näkyvän valon alueella toimittaessa taisteluilma-aluksessa voi olla asennettuna myös ihmisen silmän havaitsemaa valoa aistiva sensori, joka tuottaa operaattorille mahdollisimman reaaliaikaista kuvaa taistelukentän tapahtumista. Sensori voi olla perinteinen videokamera, mutta useimmiten käytössä on niin kutsuttu mustavalkotelevisio, koska sitä voidaan käyttää laajemmalla valaistusskaalalla.

Mustavalkotelevisio (LLTV, Low Light TeleVision) on hämäräkäyttöön optimoitu televisiovastaanotin, joka on toteutettu joko tavallisen televisioputken eteen asennetulla valonvahvistimella tai sitten erityisellä hämärätoimintaan tarkoitettulla kuvaputkella. Tällaisen kuvaputken aallonpituusalue kattaa näkyvän valon ja lähi-infrapunasäteilyn. Näkyvän valon alueella voidaan hyödyntää piipohjaista CCD-kennoa. Piin energiarakenne on sellainen, että näkyvän valon ja lähi-infrapuna-alueen ($1,1\mu\text{m}$ asti) fotonit pystyvät vapauttamaan siinä elektroneja. CCD-kennossa piitä käytetään sekä mikropiirin substraattina ja sekä ilmaisinelementtinä että ilmaisimateriaalina. Lisäksi CCD-ilmaisimien rakenteeltaan hyvin yksinkertainen. Ilmaisimissa fotonien vapauttamien elektronien varastoidaan lyhyeksi ajaksi kunkin ilmaisimipinnan alle ja varaus puretaan ilmaisimesta rivi kerrallaan siirtämällä elektronit sarjamuotoisesti elementistä toiseen ja lopulta matriisista ulos detektoripiirille, jonka jälkeen kuva muutetaan taas sarjamuotoisesta rinnakkaismuotoiseksi. Ilmaisimien toiminta perustuu kytkettyjen varauksien siirtoon. [18]s.353

3.2.3. Laserlaitteet

Laser on yksiväristä, koherenttia valoa, joka synnytetään stimuloidulla emissiolla. Laserlähettimet ovat joko jatkuvatoimisia tai pulssitettuja. Lasertekniikka mahdollistaa suuren, lyhytaikaisen ja tarkasti suunnatun säteilytehon lähettämisen. Laserlähettimet ovat sotilassovellutuksissa pääosin pulssitettuja ja ne perustuvat kiinteisiin materiaaleihin, esimerkkeinä NdYAG ja Erbium. Myös puolijohde- ja kaasulasereita käytetään. [47]s.148

Lasertekniikkaa hyödynnetään muun muassa seuraavissa sovellutuksissa: [47]s.149

- etäisyysmittaus
- maalin valaisu (hakeutuvat ammukset, ohjukset)
- laser-ase (sokaisu)
- tietoliikenne
- simulaattorit
- asentomittaus (laserhyrrä) ja
- lasertutka

Taisteluilma-aluksissa laseria hyödynnetään yleisesti asejärjestelmien käyttöön liittyen. Laserlaitteiden avulla pyritään tuottamaan järjestelmän asejärjestelmälle mahdollisen vaikuttamisen tueksi. Etäisyyden mittauksella tietokone voi laskea tarvittavat parametrit esimerkiksi ohjuksen laukaisua varten. Maalin valaisua voidaan käyttää joko laserhakupäitä hyödyntävien ohjusten käytön yhteydessä tai sillä voidaan myös osoittaa maali täysin toiselta lavetilta ammutulle ohjukselle.

Laseretäisyysmittari on laite, jolla mitataan kohteiden etäisyyksiä käyttäen apuna laservaloa. Laseretäisyysmittareita on erityyppisiä ja ne sopivat eri käyttötarkoituksiin. Tarkat etäisyysmittaukset ovat tarpeellisia esimerkiksi rakennus- ja maanmittauksessa, geodesiassa ja asejärjestelmissä. [40]



Kuva 9: Laseretäisyysmittarin toimintaperiaate

Yksinkertaisin tapa mitata etäisyys laserilla on lähettää laserpulssi, joka heijastuu kohteesta ja havaita heijastus. Koska valon nopeus on tunnettu vakio, voidaan pulssin lähettämisen ja heijastumisen välisestä ajasta laskea helposti kuljettu matka. Valon kulkuaikaan perustuvissa

laserkeilaimissa mitataan etäisyys aikana, jonka valosignaali kulkee mittalaitteesta kohteeseen ja takaisin. Koska tiedetään valosignaalin (lasersäteen) lähtökulmat (sekä vaaka- että pystysuunnassa) ja matka, voidaan laskea jokaiselle mitatulle pisteelle koordinaatit. Koordinaattien lisäksi järjestelmä tallentaa jokaiselle pisteelle myös intensiteettiarvon paluusignaalin voimakkuuden pohjalta. [46]

Toinen tapa on lähettää pitkä pulssi, jonka taajuus muuttuu tasaisesti. Pulssin heijastuksen taajuus on tietysti sama kuin pulssin taajuus sen lähtiessä ja kun heijastus tulee hieman jäljessä, lähetystaajuus on ehtinyt muuttua sillä aikaa. Heijastuksen taajuuden ja sillä hetkellä lähetetyn taajuuden erosta voidaan laskea matka-aika ja siten etäisyys. [46]

Kolmas tapa on kolmiomittaus, jossa pulssin lähtin ja heijastuksen vastaanotin ovat hieman eri paikoissa ja niiden välimatka tunnetaan tarkasti. Kun pulssi heijastetaan suoraan eteenpäin lähettimestä, vastaanottimen näkökulmasta se on hieman sivulla. Etäisyys voidaan laskea geometrisesti. [46]

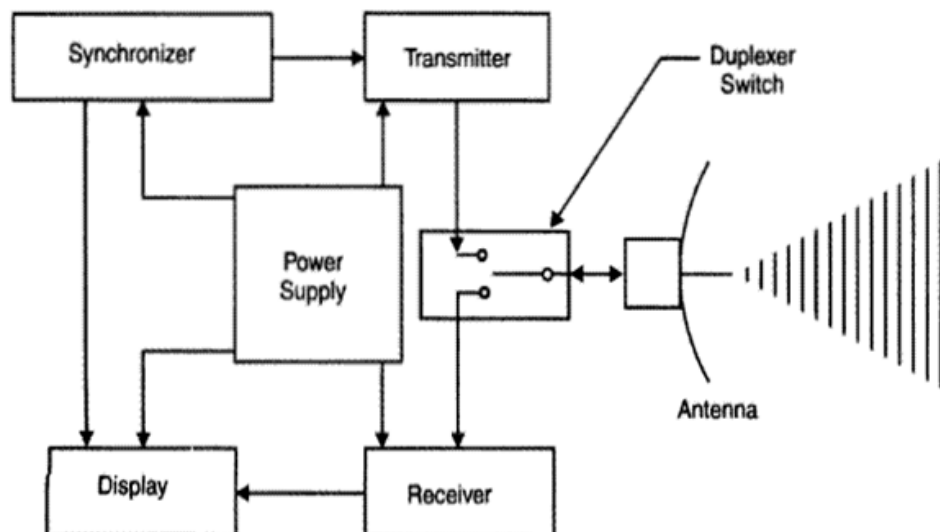
Maalinosoitusbaser on sotilaallinen laite, joka osoittaa lasersäteen avulla ohjuksen, pommin tai ohjautuvan ammuksen maalin. Ase tunnistaa säteen ja hakeutuu kohteeseen automaattisesti. Maalinosoitusbaser on suhteellisen heikkotehoinen laser, jota käytetään tyypillisesti lentokoneesta laukaistavan sädeohjatun aseiden kohteen osoittamisessa. Ase hakeutuu lentoradallensa etsiytyä kohteesta heijastuneeseen laservaloon, mikä mahdollistaa suuren osumistarkkuuden. Kun kohdetta valaistetaan maalinosoitimella lasersäde ei ole jatkuva, vaan kohteeseen kohdistetaan koodattujen sykkeiden sarja. Ohjaava tunnistin säädetään samalle taajuudelle, jolloin se pystyy erottamaan oman ohjaussäteensä alueen muista lasersäteistä. [41]

3.2.4. Tutka ja tutkahakupää

Tutka on radiotekninen mittauslaite, jonka toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn suuntaamiseen ja lähettämiseen, jolloin kohteesta heijastunut sekä sironnut säteily vastaanotetaan niin, että sen perusteella voidaan määrittää kohteen suunta ja etäisyys. Pelkistettynä tutkan tehtävät ovat: [18]s.195

1. Ilmaista maalin olemassaolo aistimalla maalista heijastunutta säteilyä.
2. Määrittää maalin etäisyys.
3. Selvittää maalin suunta kapeakeilaisella antennilla.
4. Paikantaa maalin sijainti etäisyyden ja suunnan perusteella.
5. Arvioida maalin nopeus dopplertaajuuden avulla.

Tutkat voidaan luokitella useiden eri periaatteiden mukaisesti. Sotilastutkat jaetaan: ennako-varoitus-, valvonta-, seuranta-, tulenjohto-, kartoitus-, navigointi- ja säätutkiin sekä hakupää-tutkiin. Tutkat voidaan jakaa myös lähettimen ja vastaanottimen paikan perusteella. Tällöin tutkat jaetaan mono-, bi- ja multistaattisiin sovelluksiin. [18]s.196



Kuva 10: Tutkan yksikertaistettu malli [10]

Lähetin tuottaa halutun taajuisen kanta-aallon riittävällä teholla ja tarkasti moduloituna. Mikroaaltoja tuottavana osana on joko magnetroni tai puolijohdeoskillaattori ja sen tehovahvistimena kulkuaaltoputki tai klystroni. Lähettimen toimintaa ohjaa modulaattori. [31]

Tuotettu signaali toimitetaan antennille, jonka tehtävänä on sekä lähettää että vastaanottaa järjestelmästä ulos lähtevät ja sinne palaavat signaalit. Tämä on toteutettu asentamalla anteeniin duplekserikytkin, mikä mahdollistaa saman antennin käyttämisen kumpaankin tehtävään [31]. Tällä ratkaisulla saadaan yksinkertaistettua ja pienennettyä järjestelmän kokoa, mikä on hyödyllistä erityisesti taisteluilma-aluksissa, jotka pyritään rakentamaan yleensä pienikokoisiksi.

Vastaanotettu signaali toimitetaan vastaanottimelle, jossa se myös prosessoidaan ja sen sisältämä informaatio käsitellään. Tutkan suorituskky riippuu suuresti vastaanottimen ja signaali-prosessoinnin suorituskyvystä, sillä sen on oltava riittävän herkkä eikä sen oma kohina saa olla suuri [31].

Tutkan operaattorille sen tuottama informaatio esitetään näytöllä, joka visualisoi järjestelmän tuottaman informaation. Tunnetuin tutkanäyttö on PPI (Plan Position Indicator), jossa näytetään tutka keskellä antennin suuntainen akseli kiertää sen pyörimisen tahdissa[31]. Nykyisin operaattori seuraa kuvaa tietokoneen ruudulta. Taisteluilma-alusten tapauksessa riittävän korkean tason järjestelmä, joka tekee maalitunnistuksen täysin itsenäisesti, ei välttämättä tarvitse näyttöä, jolla välittää tutkakuvaa operaattorille.

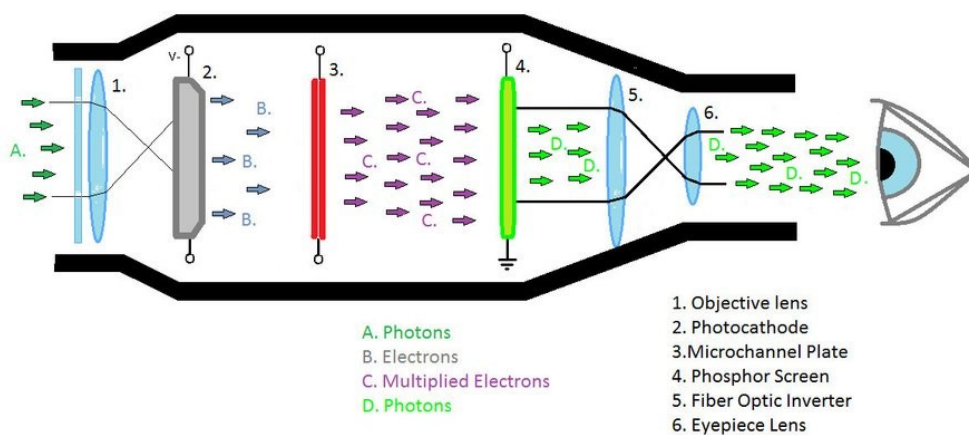
Tutkahakupäällä varustettu taisteluilma-alus tai sen käyttämä asejärjestelmä pyrkii hakeutumaan tutkan aiheuttamaan läheteeseen. Järjestelmällä on tiedossa parametrit, millaista lähetettä etsitty tutka tuottaa ja saadessaan havainnon parametrit täyttävästä havainnosta se kykenee lukittumaan siihen automaattisesti. Tällä periaatteella toimii esimerkiksi Israelilainen IAI Harpy.

Tutkasäteilyyn hakeutuvista ohjuksista käytetään yleensä nimitystä ARM (Anti-Radiation Missile). Ne etsivät ja lukkiutuvat tutkan pääkeilan ja mahdollisuuksien mukaan myös sivukeilan säteilyyn. Ohjuksen tuli kyetä hakeutumaan myös tutkan sivukeilaan, koska jos se ei kykene ilmaisemaan kuin pääkeilan, sen hakeutumiseen tarvitsema lähete on käytössä vain silloin kun tutkan antenni osoittaa ohjusta kohti. [18]s.400

Ohjus kykenee paikantamaan tutkasäteilyn tulosuunnan, muttei voi tietää sen etäisyyttä. Tutka voidaan paikantaa lähestymällä sitä vinosti, jolloin siihen saadaan useita suuntimia, joista ristuuntimalla saadaan karkea paikka. Ohjus lentää suurella nopeudella, esimerkiksi 1 km/s, joten sen on saatava signaali tutkasta useita kertoja sekunnissa koko lentonsa ajan. Mikäli tutka havaitsee ohjuksen laukaisun ja lopettaa lähetyksensä, ei säteilyyn hakeutuminen onnistu. Useimmat nykyaikaiset ohjukset jatkavat muistiyksikön ja autopilotin varassa kohteen lähestymistä. [18]s.400

3.2.5. Valonvahvistin

Valonvahvistinputkiin perustuvat pimeänäkölaitteet mahdollistavat hämärä- ja pimeätoiminnan. Ne vahvistavat pääosin näkyvän valon aallonpituuksilla kohteesta heijastuvaa säteilyä. [47]s.144. Se vahvistaa nimensä mukaisesti siihen tulevan fotonivirran moninkertaiseksi, jolloin ihmissilmä kykenee muodostamaan kuvan kohteista, joista tuleva valoteho on hyvinkin heikkoa. Valonvahvistimet toimivat yleensä näkyvän valon ja lähi-infrapun alueella, joten niiden toiminta perustuu luonnon normaaliin taustavalaistukseen [18]s.349. On olemassa myös malleja, joihin on integroitu infrapunälähetin, jonka avulla saadaan aikaan parempi näkyvyys äärimmäisen pimeissä oloissa, kuten esimerkiksi rakennusten sisällä.



Kuva 11: Valonvahvistinputken toiminta [30]

Valonvahvistimissa käytettävät vahvistinputket jaetaan käytettävien materiaalien ja toimintaperiaatteen perusteella kolmeen sukupolveen: [18]s.350

1. sukupolvi: passiiviset 1- tai useampiasteiset valonvahvistinputket
2. sukupolvi: passiiviset mikrokanavalevyvahvistinputket
3. sukupolvi: passiiviset mikrokanavalevyvahvistimet

Ensimmäisen sukupolven valonvahvistinputken etupinnalle muodostunut kuva siirretään fotokatodille, josta valosähköinen ilmiö irrottaa elektroneja. Elektronit kiihdytetään ja ohjataan jännite-eron avulla fosforikalvolle, missä fluoresenssi-ilmiön seurauksena muodostuu vahvistunut kuva kohteesta. Ensimmäisen sukupolven putkia käytetään usein useampiasteisina, eli niitä kytketään sarjaan. [47]s.144

Nykyisin käytössä olevat järjestelmät perustuvat 2. ja 3. sukupolven teknologiaan. Niissä objektiivinen muodostaa kuvan fotokatodille, josta irtoaa elektroneja valosähköisen ilmiön vuoksi. Fotokatodilta irronneet elektronit kiihdytetään voimakkaalla sähkökentällä anodin läheisyydessä olevaan mikrokanavalevyyn. Mikrokanavalevy koostuu miljoonista yhteen liimatuista 8-12 µm paksuista lasilevyistä. Kun katodilta tuleva elektroni osuu putken seinämään, se irroittaa toisioelektroneja, jotka puolestaan ajautuvat sähkökentän voimasta kohti anodia ja törmätessään putken seinämään irrottavat lisää toisioelektroneja. Kolmannen sukupolven fotokatodi on noin kolme kertaa herkempi kuin toisen sukupolven katodi. [18]s.350

Valonvahvistimet sopivat taisteluilma-aluksissa kohteen tarkkailuun pimeällä ja hämärissä olosuhteissa. Etuna lämpökameraan sillä on halvempi hinta, kyky nähdä yksityiskohtia (esimerkiksi varjot) eikä sitä tarvitse erikseen jäähdyttää käyttölämpötilaan.

3.3. Taistelulataus

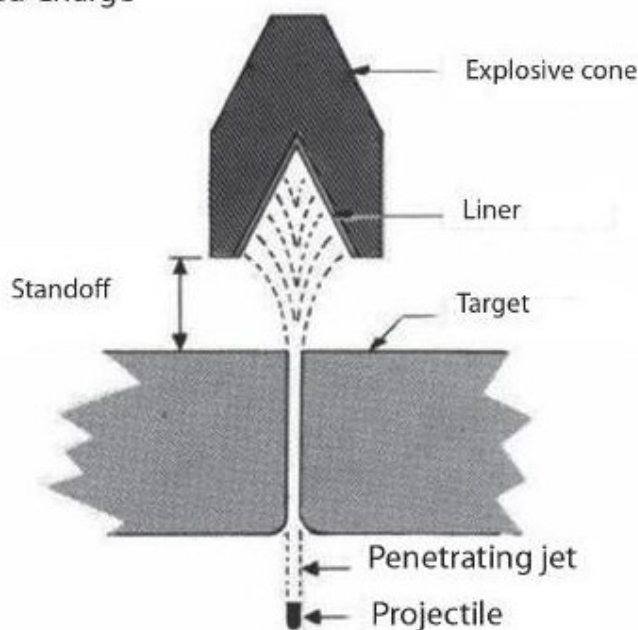
Järjestelmän taisteluosaan kuuluvat taistelulataus tai muu hyötykuorma, sytytin sekä varmistus- ja viritysjärjestelmä. Yleisimmin käytettävät vaikutusmekanismit ovat sirpalevaikutus ja suunnattu räjähdysvaikutus (ontelolataus).[47] Taistelulatauksen tarkoituksena on tuhota tai lamauttaa tunnistettu kohde. Latauksella on pääasiallisen vaikutusmekanismin lisäksi myös sekundäärisiä vaikutusmekanismeja, jotka syntyvät detonoivan räjähdysaineen vaikutuksesta.

Taisteluilma-aluksissa taistelulataukset ovat useimmiten sijoitettuna tarkkuusaseisiin. Niiden päätyypit ovat inertian, GPS:n tai niiden yhdistelmän avulla hakeutuminen ennalta määrättyyn pisteeseen ja laserohjatut pommit (LGB). [4]

3.2.1. Ontelolataus

Yleisesti erityisesti panssaroitujen kohteisiin vaikuttamiseen käytettävä lataus on ontelopanos. Se muodostuu kartion muotoisesta metallista valmistetusta ontelosta ja sen ympärille vuorattua räjähdysaineesta. Ontelopanoksissa käytettävän räjähdysaineen detonaationopeus on noin 7000 – 9000 m/s[47]s.337. Kartiossa käytetään metallina useimmiten terästä tai kuparia. Räjähdysaine sytytetään pohjasytyttimellä kärjen koskettaessa kohteen pintaa tai heätesytyttimellä halutulla etäisyydellä. Ontelopanosta käytetään niin kertasinkojen kranaateissa, panssarintorjuntaohjuksissa, panssarivaunun ampumissa kranaateissa kuin ilmasta vaikuttavien aseiden taistelulatauksena.

Shaped Charge



Kuva 12: Ontelolatauksen toimintaperiaate [26]

Ontelopanoksen teho perustuu Munroe-efektiin (Kuva 12), jossa suurella nopeudella detonoiva räjähdysaine muodostaa kartion metallista suurinopeuksisen suihkun. Suihkussa kartion metalli on kiinteässä muodossa. Suihku muodostuu kartion sisäpinnan hiukkasten muodostamasta suurinopeuksisesta kärkisuihkusta, jossa on noin 10-15% kartion massasta ja hitaammasta jälkisuihkusta [47]s.337. Nopeuseroista johtuen suihku venyy muodostuen pitkäksi ja ohueksi osuessaan panssariin. Pyörimisliike heikentää ontelopanoksen läpäisyä, sillä suihkun muoto rikkoutuu herkemmin jos sillä on liikettä pituusakselinsa ympäri. Tästä syystä ontelopanoksensisältävät kranaatit tai ohjukset ovat useimmiten pystövakavoituja.

Metallisuihkun teho panssareita vastaan perustuu pienelle pinta-alalle kohdistuvaan erittäin suureen paineeseen. Panssarin lujuuden ollessa suihkun painetta pienempi saavutetaan läpäisyä aina suihkun riittävään hidastumiseen tai muodon hajoamiseen saakka. Suihkun pituuden venyessä liikaa se hajoaa pienempiin osiin, jotka osuvat läpäistyn materiaalin seinämiin eivätkä lisää läpäisyä pohjalla [37].

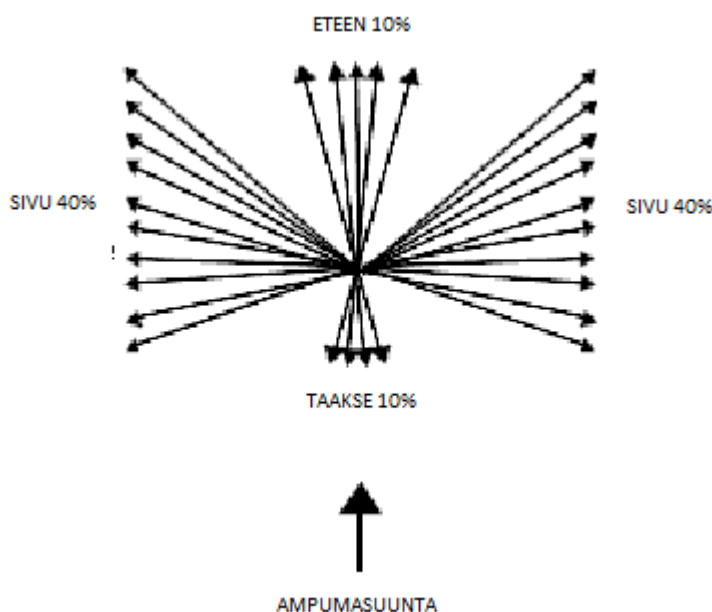
3.2.1. Sirpalelataus

Sirpalelatauksen teho perustuu räjähdysaineen detonoidessa tapahtuvaan kuoriaineen hallit-
tuun hajoamiseen ja sen pienien kappaleiden saamaan suureen liikenopeuteen. Sirpalelatauk-
sen räjähtäessä syntyy paine, jonka vaikutuksesta latauksen teräksinen tai valurautainen kuori
sirpaloituu 0,1 – 0,3 millisekunnissa. Ennen halkeamistaan kuori paisuu, kunnes kyseisen ma-

teriallin murtoraja ylittyy. Latauksen eri osista syntyy eri kokoisia sirpaleita riippuen kuoriaineen laadusta, lujuudesta ja paksuudesta sekä räjähdysaineen detonaationopeudesta ja räjähdysenergiasta. Luonnollisen sirpaleen massajakauma on laaja ($<0,5 - >16\text{g}$). Sirpaleet ovat rosoreunaisia keskimääräinen ja sirpalekoko on verrannollinen ammuksen kaliiperiin. Sirpaloitumiseen vaikuttaa muun muassa [47]s.319:

- Sirpaloituvan materiaalin laadulla
- Taistelukärjen muotoilulla
- Räjähdysaineen laadulla ja määrällä
- Ohjatulla sirpaloitumisella ja
- Esisirpaloinnilla

Sirpalelatauksen hyöty verrattuna ontelolataukseen on laajempi vaikutusalue, jolloin saavutetaan suurempi vaikutus pinta-alaltaan suurempiin maaleihin. Sirpalelatausta käytettäessä on myös huomioitava latauksen räjäytyskulma, sillä syntyvä sirpaleviuhka (kuva 13) ei jakaudu kaikkiin suuntiin tasaisesti. Latauksen räjähtäessä suurin osa sirpaleista suuntautuu sivuille [47], jolloin taistelulatauksen on edullisinta olla kohteeseen nähden kohtisuorassa. Sirpaleiden pienen koon, epäsäännöllisen muodon ja nopean hidastuvuuden vuoksi niiden vaikutus panssaroituun kohteeseen on melko heikko.



Kuva 13: Esimerkki sirpaleiden jakautumisesta räjähdyksessä

Sirpalevaikutus perustuu siihen, että syntyneet sirpaleet osuvat kohteeseen, läpäisevät mahdolliset suojarakenteet ja tunkeutuvat siihen aikaansaaden vaikutuksen. Tällaisia sirpaleita kutsutaan tehokkaiksi sirpaleiksi [47]s.320. Tyypillisesti suurin osa latauksessa muodostuvista sirpaleista eivät osu kohteeseen ja ovat näin hyödyttömiä vaikutuksen kannalta.

3.2.2. Muut vaikutusmekanismit

Räjähdysaineen detonoidessa se synnyttää aina myös suuren paineen joka vaikuttaa räjähdysten läheisyydessä. Painevaikutus johtuu energian nopeasta vapautumisesta kemiallisissa reaktioissa tai massan muuttumisesta ydinräjähdyksessä, joista on seurauksena voimakas ja äkillinen paineen nousu. Räjähdyksestä tai amunnasta aiheutuu vapaassa tilassa ympäristöön säteittäisesti leviävä paineaalto. Siinä on nopea paineen nousu hitaampi lasku lievään ja yli-painevaihetta pitkäkestoisempaan alipainevaiheeseen. [47]s.322.

Paine vaikuttaa kohteeseen tuhoamalla herkkiä osia niin henkilöstöstä kuin kalustostakin. Ihmiselle räjähdysten luoma paine aiheuttaa esimerkiksi tärykalvojen repeämisen, sinkoutumisen paineaallon suuntaisesti tai pahimmillaan vaurioita herkille sisäelimille. Laitteistoissa heikoimmillaan ovat herkäät instrumentit ja sensorit, jotka hajoavat suojaamattomina suuren ylipaineen johdosta. Paineen vaikutus laskee kuitenkin erittäin nopeasti etäisyyden kasvaessa ja siltä kykenee suojautumaan tehokkaasti ilmatiiviillä tilalla. Tyypillisimmät taistelulataukset sisältävät myös räjähdysainetta niin vähän, että painevaikutukset eivät nouse merkittäviksi. Paineen merkitys on suurimmillaan räjähdysten tapahtuessa suljetussa tilassa, sillä tällöin paine ei pääse laskemaan nopeasti ja se aiheuttaa huomattavasti suuremmat vaikutukset.

Täry- eli shokki-iskuvaikutus on lyhytkestoinen kiihtyvyysrasitus, joka välittyy taistelijaan esimerkiksi panssariajoneuvon rungon välityksellä siihen osuneen ammuksen tai miinan räjähdysten seurauksena. [47]s.326. Voimakas kiihtyvyys saattaa aiheuttaa vaurioita herkille sisäelimille tai esimerkiksi jalkapöydän luiden murtumisen niiden ollessa panssaroitua lattiaa vasten.

Räjähdysaineen detonoidessa syntyy myös valoa ja lämpöä, jotka voivat johtaa poltto- ja sokaisuvaikutukseen. Räjähdyksessä syntyvän tulipallon ollessa kuitenkin pienempi kuin sirpaleiden tai paineaallon vahingollinen ulottuvuus [47]s.326, jää sen merkitys kokonaisuudessaan todella vähäiseksi. Sokaisuvaikutuksella pyritään lamauttamaan ihminen tai vahingoittamaan valoa aistivia kohdejärjestelmän sensoreita. Sekä poltto- että sokaisuvaikutusta voidaan säädellä käytettävän räjähdysaineen lisäaineilla.

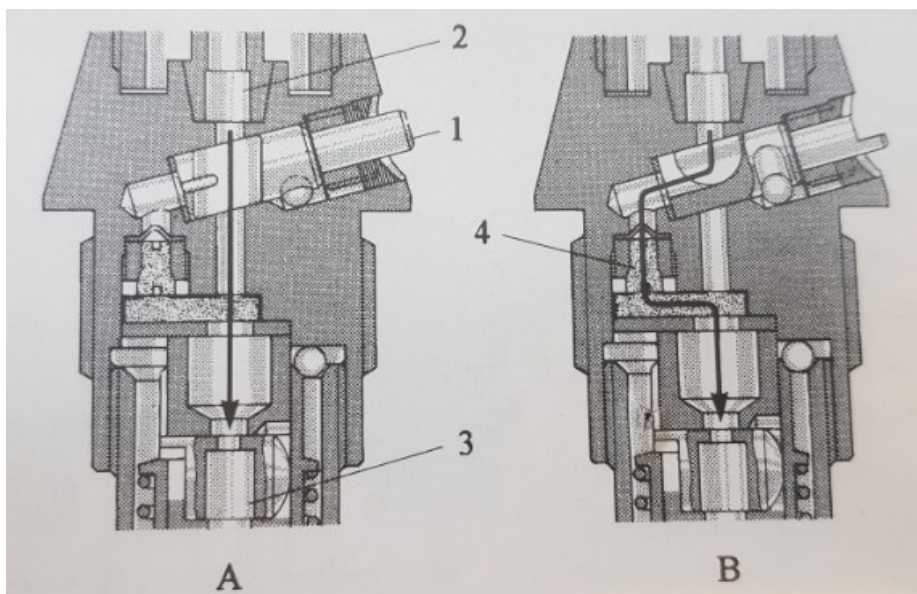
3.2.3. Sytytin

Sytytin saa taistelulatauksen toimimaan tarkoituksen edellyttämällä tavalla kohteessa, sen välittömässä läheisyydessä tai ennalta asetetun ajan kuluttua. Nämä toimintatavat edellyttävät sytyttimiltä erilaisia rakenneperiaatteita. Toimintatavan perusteella sytyttimet jaetaan isku-, aika- ja herätesytyttimiin sekä näiden yhdistelmiin eri moniherätesytyttimiin. [47]s.51. Sytyttimen oikean toiminnan avulla varmistetaan taistelulatauksen vaikutus oikeaasa paikassa suhteessa kohteeseen ja lisäksi se toimii järjestelmän turvallisuustekijänä, jolla estetään ennenaikainen räjähdys.

Sytyttimet voidaan rakenteensa puolesta jakaa mekaanisiin ja sähkötoimisiin. Mekaaniset sytyttimet koostuvat yleensä rungosta, isku- ja varmistuskoneistosta sekä räjähdysvälitys- eli pyroketjusta. Lisäksi sytyttimeen kuuluu tarvittaessa hidastusjärjestelmä ja itsetuholaite. Sähkötoimisissa sytyttimissä on edellisten pääosien lisäksi yleensä energianlähde ja ohjauselektroniiikka. [47]s.53.

Iskusytyttimen toiminta perustuu fyysiseen kontaktiin taistelulatauksen ja kohteen välillä. Kohteeseen osuminen aiheuttaa iskurin tunkeutumisen iskunalliin ja sytyttää sen. Sytyttimessä olevat mahdolliset varmistimet ovat kytkeytyneet pois päältä ennen kohteeseen osumista joko ohjattuina tai kiihtyvyyksien ansiosta.

Iskusytytin voi toimia herkkänä, jäykkänä tai hidasteisena. [47]s.60. Valittava toimintatapa määräytyy taistelulatauksen halutun räjähdyspaikan mukaiseksi. Herkkä sytytin räjähtää jo mahdollisimman kevyestä paineesta kun taas jäykkä tarvitsee enemmän painetta iskurille ennen toimintaa. Jos halutaan latauksen tunkeutuvan kohteeseen ennen räjähdystä, käytetään hidasteista iskuria. Hidastus tapahtuu tässä tapauksessa sytytysnallin jälkeen sijoitetun hidastepanoksen avulla, jonka aikaansaama viive on yleensä 0,05 – 0,2 sekuntia [47]s.61. Sähkötoimisessa iskusytyttimessä on iskukoneisto korvattu erillisellä laukaisulaitteella, joka sisältää virtalähteen, sähkönallin ja tarvittavat varmistimet.



Kuva 14: Hidasteisen iskusytyttimen toiminta herkkänä (A) ja hidasteisena (B) [47]s.61

1.Hidastuksen asetusakseli, 2.Iskunalli, 3.Räjähdysnalli ja 4.Hidastuspanos.

Aikasytyttimen avulla lataus saadaan räjähtämään halutun ajan kuluttua Aikautuksen perusteella ne jakautuvat mekaanisiin-, palo- ja sähkötoimisiin aikasytyttimiin. Mekaanisessa aikautus tapahtuu jousivoimaisella kellokoneistolla, sähkötoimisessa ohjauselektronikan toiminnanohjausosassa ja paloaikasytyttimessä se perustuu massan paloaikaan [47]s.64. Aikasytytin ei toimintaperiaatteensa puolesta sovellu käytettäväksi tutkimuksessa tarkasteltaviin järjestelmiin, sillä niiden etäisyys kohteesta vaihtelee ja ohjelmointi ennen taistelulatauksen laukaisua pitäisi tehdä aina täsmällisesti paikan suhteen. Vaikutukseen päästäänkin helpommin muilla sytytintyyeillä.

Herätesyttimien tehtävänä on räjäyttää lataus halutulla korkeudella kohteen yläpuolella. Kohteen mittaustavan mukaan herätesyttimet voidaan jakaa radiotaajuisiin ja optisiin herätesyttimiin. [47]s.65.

Radiotaajuisten herätesyttimien toiminta perustuu tavallisesti Doppler-tutkaan. Radiolähetin lähettää radioaaltoja tietyllä taajuudella ympäristöön. Radioaallot heijastuvat kohteesta ja samalla niiden taajuus muuttuu hieman. Tajuuden muutos riippuu ammuksen liikkeestä kohteeseen nähden, jolloin vastaanotetun signaalin taajuus kasvaa kohteen lähestyessä. Lähetettyä ja vastaanotettua signaalia verrataan toisiinsa ja tiettyjen ehtojen toteutuessa sytyttimen toiminnanohjausosa antaa nallinohjauskoneistolle käskyn räjäyttää sytyttimen sähkönalli. [47]s.66. Sytyttimen toiminnan kannalta on olennaisen tärkeää että se pysyy

suunnattuna kohteeseen. Tähän tarvitaan ohjauskykyä ja tietokoneen suorittamaa lentoratakorjausta tarvittaessa.

Optiset herätesytyttimet voivat toimia aktiivisesti tai passiivisesti. Aktiivisessa versiossa maali valaistaan ja kohteesta heijastuvaa valoa mitataan. Kohteen etäisyyden määrittämiseen käytetään tällöin kolmiomittausperiaatetta tai valon etenemisnopeutta. Mittaustavasta johtuen sytytintä on vaikea häiritä elektronisesti [47]s.67.

Passiivinen optinen herätesytytin mittaa kohteen omaa tai kohteesta heijastuvaa näkyvää valoa tai infrapunasäteilyä. Sytyttimen etuna on pieni tehontarve ja paljastumistodennäköisyys. Sytytintyyppi on kuitenkin herkkä ilmassa oleville optisille häiriötekijöille. [47]s.68. Tämän kaltainen sytytin voi olla esimerkiksi ohjuksessa, joka laukaistaan taisteluilma-aluksen toimesta maanpinnalla olevan tiedustelijan laserilla osoittamaan maaliin.

Herätesytyttimet ovat käyttökelpoisia erityisesti tutkaan hakeutuvissa aseissa. Kohteen tutkalähtetimen tuhoaminen on tehokkainta taistelulatauksen räjähtäessä optimaalisella korkeudella vaikuttaen lähtetimen antenneihin ja lähtetimiin. Haluttaessa vaikuttaa liikkuvaan lavettiin (esimerkiksi panssarivaunu) on iskusytytin ja ontelopanos tehokkaampi valinta kohdistetumman vaikutuksen takia.

3.4. Tietokone

Tietokone on laite, joka käsittelee numeeris-loogista tietoa ohjelmointinsa mukaisesti. Arkielämässä tietokoneella tarkoitetaan yleensä yleiskäyttöistä laitetta, joka on tarkoitettu suorittamaan monenlaisia tietojenkäsittelytehtäviä. Tietokoneen toimintaa ohjaa suoritin eli prosessori, joka tulkitsee konekielisiä käskyjä ja ohjaa niiden mukaan tietokoneen eri toimintoja. Suoritin suorittaa ohjelmaa lukemalla peräkkäisiä muistipaikkoja alueelta johon ohjelmakoodi on tallennettu, ja tulkitsemalla lukemansa bittijonot konekielisiksi käskyiksi. Käsky suorittaa yleensä jonkin yksinkertaisen alkeisoperaation, kuten luvun lukemisen muistipaikasta, kahden luvun välisen laskutoimituksen tai ohjelman suoritusosoitteen ehdollisen vaihtamisen. Käskyn suorituksen päätteeksi suorittimen sisäisissä muistipaikoissa, ns. rekistereissä sijaitsevat laskennan lopputulokset tallennetaan toisella käskyllä takaisin muistiin. [43]

Vaikka kaikki tietokoneet pystyvätkin periaatteessa suorittamaan samat tehtävät, jotkin ovat huomattavasti soveltuvampia joihinkin tehtäviin kuin toiset. Suorituskykyä erityyppisissä tehtävissä mitataan vertaillen niin sanotuilla *benchmarking*-testeillä. Riittävän suorituskyvyn lisäksi merkittäviä tekijöitä ovat muun muassa koneen vakaus, vikasietoisuus, virrankulutus, fyysinen koko, ohjelmistoyhteensopivuus sekä hankinta- ja käyttökustannukset. [43]

Taisteluilma-aluksissa tietokoneen tehtävänä on koota eri sensorien välittämää informaatiota ja välittää sitä operaattoreille sekä operaattorin käskyjä sensoreille ja järjestelmille. Järjestelmän autonomisuuden tasosta riippuen se tekee myös itsenäisiä päätöksiä osajärjestelmien toiminnasta, mikäli siihen asennetut parametrit sen sallivat. Se toimii siis kokoavana osana kaikkien järjestelmän eri osajärjestelmien välillä ja linkkinä käyttäjään.

Tietokoneen voidaankin katsoa olevan toinen osa, jolla laitteen autonomia rakentuu. Siihen ladataan toimintaohjeet ja rajoitteet järjestelmän eri käyttötilanteisiin ja se antaa osajärjestelmille käskyt toimeenpanna suoritteita. Toinen osa koostuu sensoreista ja osajärjestelmistä, jotka tuottavat dataa analysoitavaksi ja fyysisesti mahdollistavat esimerkiksi aseellisen vaikutamisen viholliseen.

4. TAISTELUILMA-ALUSTEN KÄYTTÖ

4.1. Käyttö nykypäivänä

Taisteluilma-alukset ovat nykyään yksi taistelukentän elementti, jolla pyritään vaikuttamaan vihollisen kohteisiin ja järjestelmiin sekä hankkimaan tietoa niiden toiminnasta. Niiden rooli osana taistelujärjestelmää on jatkuvasti kasvussa ja useat kehittyneet asevoimat ovat panostaneet merkittävästi omien järjestelmien kehittämiseen sekä entisten päivittämiseen. Niiden tehtäväkenttä on viime vuosikymmenen aikana laajentunut voimakkaasti ja teknologian kehittyessä ne kykenevät toimimaan yhä tehokkaammin tukevana elementtinä perinteisten taistelutapojen rinnalla.

Huomionarvoista on myös kehityksen suuntautuminen käyttötarkoitukseltaan monen tyyppiin erilaisiin aluksiin. Operatiiviseen käyttöön on otettu tai ollaan kehittämässä niin useaan eri tehtävätyyppiin sopivia suurikokoisia aluksia kuin täsmätehtäviin tai –vaikuttamiseen pyrkiviä pieniä malleja. Muun aseteknologian kehityksestä poiketen kehitys suuntautuu sekä mahdollisimman halpaan että kallista huipputeknologiaa sisältävien ratkaisujen kehitykseen.

Miehittämättömien alusten suurin vahvuus on niiden soveltuvuus usean tyyppiin eri tehtäviin. Niiden sisältämien osajärjestelmien ja sensorien määrästä riippuen voidaan niitä hyödyntää ainakin seuraavissa tehtävätyypeissä:

- tiedustelu- ja valvonta
- tarkkailu
- tuhoamistehtävät
- paikannus
- maalinosoitus
- suojaaminen
- lähitulituki

Taisteluilma-alusten hyöty on niiden luomassa uhkassa kohdealueella, jota kohteena oleva ei välttämättä edes itse tiedosta. Aluksen tyypistä riippuen uhka voi olla yhtäjaksoisesti jopa päivien mittainen (vaanivat järjestelmät) tai olla hyvinkin lyhytaikainen, mutta suunnattu tarkasti tunnistettua uhkatekijää vastaan (parveilevat järjestelmät). Aluksilla on useimmiten myös ympärivuorokautinen toimintakyky joten niiltä ei voi suojautua yöllä.

Taisteluilma-alukset voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan kahteen luokkaan: vaaniviin ja parveileviin. Vaanivat järjestelmät liikkuvat ilmatilassa tarkkaillen ympäristöä ja etsien mahdollista vaikuttamisen kohdetta. Ne luovat alueelle pitkäaikaisen uhan ja iskevät sopivaan maaliin sen tullessa tuhoamisalueelle. Vaaniva järjestelmä voi olla joko operaattorin ohjaamia tai kyetä itsenäiseen vaikuttamiseen tarkkaan spesifioitua kohdetta vastaan.

Parveileva järjestelmä koostuu useista eri laveteista, jotka jakavat yhteisen tilannetiedon ja kykenevät keskinäiseen päätöksentekoon. Ne kykenevät sopeuttamaan toimintansa saamansa tehtävän optimaaliseksi toteuttamiseksi. Parveileva järjestelmä voi toimia joko Master-slave –periaatteella, jossa yksi lavetti johtaa parvea tai parvena, jossa päätöksenteko perustuu joukkoälyyn ja yhteiseen tilannekuvaan.

4.2. SWOT-Analyysi

Taisteluilma-alusten käyttö nykypäivänä ja lähitulevaisuudessa tulee yleistymään taistelukentällä. Taisteluilma-alusten nykytilan selvittämiseksi ja niiden käytön etujen ja haittojen selvittämiseksi suoritetaan tutkielmassa SWOT-analyysi, jolla pyritään selvittämään järjestelmien nykytila osana taistelua. Analyysi ei käsittele pelkästään järjestelmien tekniikkaa, vaan siinä huomioidaan myös yleisiä asioita, jotka vaikuttavat niiden käyttöön edistävästi tai rajoittavasti.

Analyysillä pyritään kokoamaan tutkielman teon aikana tulleet havainnot taisteluilma-alusten ominaisuuksista, käytöstä ja kokemuksista. Jonkin elementin sijoittuminen tiettyyn kategoriin voi olla kyseenalaista, sillä alusten ominaisuudet voivat olla hyvinkin erilaisia. Ilma-alusten ominaisuuksia pohditaan yleisesti, ei yksittäisen järjestelmän pohjalta.

SWOT-ANALYYSI TAISTELUILMA-ALUKSET	
VAHVUUDET	HEIKKOUEDET
Turvallisuus Toimintakyky Kyky tukea useita eri tehtävätyyppejä Hinta (pienet) Varusteltavuus Koko Ei ihmisen turvavarusteita	Operaattorin koulutus Hyötykuorma Hinta (suuret) Toiminta-aika (pienet) Autonomisen tason luokittelu Aikahäviö
MAHDOLLISUUDET	UHAT
Tekninen kehitys Joukkojen vähentäminen Laaja valvontakyky Autonomian kehittyminen Vaikeat vastatoimet Pelotevaikutus	Kansainvälinen vastustus Luotettavuus Lainsäädäntö Sääolosuhteet Ase-vasta-ase -kehitys Innovatiivinen terrorismi Hakkerointi

Kuva 15: SWOT-analyysi taisteluilma-aluksista

4.2.1 Vahvuudet

Taisteluilma-alusten käytössä suurimmaksi vahvuudeksi nousee niiden vähentävä vaikutus omien joukkojen kokemia tappioita kohtaan. Käytettäessä miehittämättömiä järjestelmiä operaattorin henki ei ole välittömästi vaarassa ja mahdollisesti koettavat konetappiot ovat yleisesti hyväksyttävämpiä kuin ihmishenkien menetykset. Niiden hyödyntäminen vapauttaa myös henkilöstöä muihin tehtäviin, joissa tarvitaan ihmisvoimaa. Operoitaessa miehittämättömällä lavetilla siihen ei myöskään tarvitse rakentaa turvajärjestelmiä, jotka normaalista miehitetystä ilma-aluksesta löytyvät turvaamaan miehistön henkeä. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi ohjaamo, heittoistuin, panssarointi ja hapentuotto. Tällä kyetään kohdentamaan aluksen valmistuksessa käytettäviä resursseja muihin osajärjestelmiin.

Järjestelmien toimintakyky on myös hyvä. Niillä kyetään operoimaan järjestelmästä riippuen monissa eri olosuhteissa ja ympäristöissä. Ne kykenevät toimimaan myös huomattavan pitkiä

aikoja ilmatilassa yhtäjaksoisesti, jolloin toiminnan jatkuvuus turvataan taistelukentällä. Toimintakyky kyetään useimmiten myös räätälöimään tehtäväkohtaisesti varustamalla taisteluilma-alus niillä sensoreilla ja aseistuksella, joita se tulee seuraavassa tehtävässään tarvitsemaan. Tällä saavutetaan myös painonsäästöä ja sitä myöten pidempi operointiaika taistelualueella. Varusteltavuuden haittapuolena on kuitenkin järjestelmän tarvitsema valmistautumisaika uuteen tehtävään, mikäli se poikkeaa edellisestä.

Ehdoton vahvuus on myös järjestelmien kyky tukea monia erilaisia tehtävätyyppejä. Aluksia voidaan käyttää alueiden valvontaan, tiedusteluun, etsintään, seuraamiseen paikantamiseen, maalinosoitukseen, kohteiden tuhoamiseen sekä moniin muihin tehtäviin. Kyky on tietysti järjestelmäkohtainen ja tyypillisesti sitä rajoittuneempi, mitä pienempi alus on kyseessä. Tämä johtuu eri tehtävätyyppien vaatimien sensorien ja osajärjestelmien määrästä, joiden kanto-kykyä pienikoinen lavetti rajoittaa. Monikäyttöisyys helpottaa myös logistiikkaa, sillä taistelualueelle ei tarvitse tuoda useita eri järjestelmiä vaan monet tehtävät kyetään suorittamaan yhdellä ja samalla järjestelmällä. Tämä helpottaa etenkin kuljetuksissa, täydennyksissä ja järjestelmien kunnossapidossa.

Alusten koko on myös usein myös huomattavan pieni verrattuna miehitettyihin ilma-aluksiin. Tämä vaikeuttaa niiden havaittavuutta ja mahdollistaa lavetin tuomisen lähemmäksi haluttua kohdetta. Tosin monipuolisimmat järjestelmät kuten MQ-9 Reaper vastaavat kokoluokaltaan jo miehitettyä hävittäjää. Kasvanutta kokoa pyritään kompensoimaan stealth-ominaisuuksilla, kuten pyöreällä muotoilulla ja erikoispinnoitteiden sekä –maalien käytöllä.

4.2.2 Heikkoudet

Taisteluilma-alusten käytöstä löytyy myös heikkouksia. Koska kyseessä on suhteellisen uusia taistelujärjestelmiä, niin ensimmäinen tunnistettu heikkous on operointiin kykenevän ja kokeneen henkilöstön riittävyys. Esimerkiksi MQ-9 Reaperin operaattoreista on merkittävää pulaa ja nykyinen henkilöstö on vahvasti ylityöllistettyä [2]. Alusten pitkäkestoinen operointi vaatii jatkuvasti operaattorin valvomaan järjestelmän toimintaa ja tekemään tarvittaessa päätöksiä. Tämä ongelma ei tietenkään kosketa korkeimman tason autonomian omaavia järjestelmiä, jotka kykenevät itsenäiseen operointiin tehtävänsä mukaisesti.

Myös järjestelmien mahdollistama hyötykuorma on hyvin rajallinen verrattaessa miehitettyihin ilma-aluksiin. Tämä aiheuttaa tarpeen tehdä kompromisseja koneen varustelussa ja operointiajassa. Rajoitettu kapasiteetti johtuu alusten kevyestä rakenteesta ja pienemmistä lentonopeuksista verrattuna miehitettyihin aluksiin. Pienillä laveteilla operointiaika on myös tyypillisesti melko lyhyet ennen täydennystä uutta tehtävää varten. Etenkin pienimmät sähkö-

moottorilla varustetut lavetit ovat hyvinkin lyhytkäyttöisiä eivätkä luo alueelle jatkuvaa uhkaa.

Monimutkainen teknologia myös tekee aluksista kalliita. Erityisesti useaan eri tehtävätyyppiin soveltuja järjestelmä pitää varustaa monilla eri sensoreilla, asejärjestelmillä ja muilla osajärjestelmillä suorituskyvyn saavuttamiseksi. Sotilasteknologian ollessa kallista ja taisteluilma-alusten käyttäessä pääsääntöisesti tuoreinta tekniikkaa, nousevat niiden valmistuskustannukset kohtuuttoman suuriksi. Tästä johtuukin se, että laitteita kehitetään pääasiallisesti rikkaissa teollisuusmaissa ja johtavissa sotilasvaltioissa. Nyrkkisääntönä voitaneen pitää, että mitä suurempi on aluksen lavetti, sitä korkeampi on sen hinta. Esimerkkinä yhden MQ-9 Reaperin hinnaksi tuli Yhdysvaltain asevoimille noin 16,9 miljoonaa dollaria [9].

Taisteluilma-alusten autonomian tason luokittelu on myös vaikeaa. Aluksen koostuessa useista osajärjestelmistä, joiden itsenäinen päätöksentekokyky voi olla hyvinkin erilainen on vaikea asettaa järjestelmää kokonaisuutena tietylle tasolle ainakaan US Air Forcen luokituksen mukaisesti. Yksityiskohtaisempi ja standardoitu luokitusjärjestelmä palvelisi myös tulevaa lainsäädäntötyötä määriteltäessä järjestelmien käytön mahdollisuuksia laitteiden yleistyessä.

Tunnistettu heikkous on myös järjestelmän, operaattorin ja ylemmän komentoketjun aiheuttama mahdollinen aikaviive havainnosta vaikuttamiseen ihmisen tehdessä päätöksen asejärjestelmien käytöstä. Taisteluilma-alusten partioidessa laajalla alueella saattaa eteen tulla tilanteita, joissa maaliin vaikuttamisen päätöksestä operaattorin valtuudet eivät riitä, vaan lupa on saatava komentoketjussa ylempänä olevalta. Tämä aiheuttaa viiveen, joka voi pahimmillaan johtaa kohteen pakenemiseen. Viivettä voidaan poistaa yksiselitteisellä tehtävänmäärittelyllä ja selkeillä toimivaltuuksilla operaattorille.

4.2.3 Mahdollisuudet

Suurin mahdollisuus taisteluilma-aluksille on teknologian kehittyminen ja sen saatavuuden parantuminen. Kehittyneemmällä moottoriteknologialla saavutetaan pienempää polttoaineenkulutusta, jolloin kyetään pidempiin operointiaikoihin ja materiaalitekniikan kehittyessä saavutetaan keveämpiä lavetteja, jotka antavat pienemmän tutkaherätteen. Sensoreiden kehityksen myötä alukset kykenevät operoimaan yhä pidemmän matkan päästä kohteesta, tuottamaan tarkempaa dataa operaattorille tai keskusyksikölle sekä kommunikoidaan ja toimimaan yhä tehokkaammin yhteistyössä ympärillä olevien omien järjestelmien kanssa. Teknologian kehittyminen ja yleistyminen johtaa myös järjestelmien hintojen laskuun, jolloin ne ovat aiempaa helpommin saatavilla myös pienemmällä budjetilla operoiville asevoimille.

Taisteluilma-aluksilla kyetään suorittamaan monen kaltaisia tehtäviä ja operointiaika voi olla hyvinkin pitkä. Tämän lisäksi ilmasta operoiva alus kykenee valvomaan laajoja alueita ja suorittamaan tehtäviä huomattavasti maanpinnalla toimivaa järjestelmää tai ihmistä nopeammin. Tämän johdosta järjestelmien käytöllä voidaan vähentää henkilöstöä esimerkiksi tiedustelu- ja valvontatehtävistä ja kohdistaa rajoitettuja resursseja tehtäviin, joissa tarvitaan ihmisen läsnäoloa. Tulevaisuudessa autonomisten järjestelmien mahdollinen yleistyminen kaikissa taistelukentän ulottuvuuksissa saattaa johtaa myös ihmisten kokonaismäärän merkittävään supistamiseen joukoissa. Myös tiettyjen tehtävätyyppien kuten esimerkiksi valvonnan ulkoistaminen itsenäisille järjestelmille on mahdollista tulevaisuudessa.

Autonomisten ominaisuuksien kehittyminen avaa myös uusia mahdollisuuksia taisteluilma-alusten hyödyntämiseen. Tekoälyn kehittyessä järjestelmä voi oppia omista virheistään ja oppia ennakoimaan tilanteita, jolloin se kykenee suorittamaan sille annetut tehtävät tehokkaammin. Myös kommunikointi ympäristön kanssa voi mahdollistaa erittäin paljon nykyistä tarkemman ja reaaliaikaisen tilannekuvan tuottamisen operaattoreille sekä muille alueella toimiville omille joukoille.

Alusten ollessa yleensä melko pienikokoisia myös niitä vastaan toimiminen voi olla haastavaa ja kustannustehotonta. Esimerkiksi pieniä lennokkeja on hyvin vaikea poistaa taivaalta käyttämättä niihin kohtuuttoman suurta panostusta. Lisäksi parvessa toimivat alukset tuottavat todellisen haasteen yksittäisen maalin ollessa pieni, mutta maaleja yhteensä voi olla jopa satoja. Tällainen hyökkäys kyllästää kohteen omasuojajärjestelmän ja osa järjestelmistä pääsee iskemään kohteeseen. Pienikokoisten alusten havaitseminen valvontajärjestelmillä voi olla myös hankalaa. Yleisesti ottaen tehokkain keino alusten käytön estämiseksi onkin tuhota mahdollisen operaattorin maa-asema.

Huomioonotettava on myös ilmasta operoivien taistelujärjestelmien luoma pelotevaikutus maan pinnalla operoiville joukoille. Kyetessään operoimaan tulevaisuudessa jopa päiviä taistelualueella ja aiheuttaessaan jatkuvan uhan iskusta pakottaa järjestelmä vastustajan ryhtymään toimenpiteisiin, joita kyetään edelleen käyttämään hyväksi omassa toiminnassa. Vaikutusta voi verrata miinakauhuun, jota esiintyy joukossa sen törmättyä miinoitteeseen ja hidastaa tai parhaassa tapauksessa jopa lamauttaa sen liikkeen. Taisteluilma-alusten tapauksessa tämä ei ole edes paikallisesti sidottu, vaan sillä kyetään luomaan pelote koko taistelukentän syvyyteen.

4.2.4 Uhat

Kansainvälisesti asevaikutusta ja tappavaa voimaa käyttäviä itsenäisiä taistelujärjestelmiä on arvosteltu ja niiden toimivuutta sekä eettisyyttä on asetettu kyseenalaiseksi. Heinäkuussa 2015 tuhatkunta tiedemiestä ja yritysjohtajaa allekirjoitti julkilausuman, jossa varoitettiin keinoällyn sotilaallisen käytön vaaroista, joiden pelättiin johtavan jopa ihmiskuntaa uhkaavaan asevarustelukilpaan [19]. Tappavaa voimaa käyttävien autonomisten järjestelmien kieltämistä perustellaan esimerkiksi järjestelmän kyvyttömyydellä varmuudella erottaa legitiimi kohde sekä mahdottomuudella antautua tällaisen järjestelmän edessä halutessaan.

Toinen uhkakuva on laitteiden lopullinen luotettavuus. Voidaanko katsoa järjestelmän olevan sillä tasolla että sille voidaan täysi kontrolli tietyn osa-alueen toiminnoista? Tyypillisesti nykypäivän taisteluilma-aluksissa luotetaan jo siihen, että se kykenee suorittamaan täysin itsenäisiä lentotehtäviä. Asevaikutus on kuitenkin haluttu pitää suurilta osin ihmisen hallinnassa. Useimmiten kuitenkin järjestelmissä pidetään man-in-the-loop –optio eli ihminen kykenee keskeyttämään järjestelmän toiminnan halutessaan.

Varsinkin rauhan ajan lakien vallitessa myös lainsäädäntö asettaa rajoituksia miehittämättömien ilma-alusten käytölle. Tehtävän tai harjoituksen suunnittelu pitää aloittaa todella hyvissä ajoin ennen aiottua ajankohtaa ja siitä on tehtävä tarvittavat ilmoitukset ja ilmatilan varaukset eri viranomaisille. Myös kaupallisten lennokkien käyttöä ilmatilassa rajoitetaan virkavallan toimesta. Sotatilassa näitä esteitä käytölle ei kuitenkaan ole, vaan ilma-aluksia käytetään parhaaksi katsotulla tavalla huomioiden yhteistyö muiden omien toimijoiden kanssa.

Myös sääolosuhteet rajoittavat taisteluilma-alusten käyttöä. Ankarat ja poikkeavat sääolosuhteet voivat estää alusten käytön kohdealueella, sillä ne voivat aiheuttaa tilanteita, joihin aluksen ohjauskyky tai –kapasiteetti eivät riitä. Tämä voi johtaa pahimmillaan aluksen menettämiseen. Suuremmat alukset pystyvät toimimaan useammissa sääolosuhteissa.

Sodankäynnin ja aseteknologian kehittymistä koko sen historian ajan leimannut ase – vasta-ase-kehitys tulee todennäköisesti vaikuttamaan myös taisteluilma-alusten käytön tulevaisuuteen. Nykytilanteessa niitä vastaan toimiminen on hankalaa ja vaatii kalliiden järjestelmien kuten ilmatorjuntaohjusten käyttöä. Tulevaisuudessa voitane kehittää esimerkiksi pienempiä hakeutuvia ammuksia tai elektronisesti alukset lamauttavia järjestelmiä. Tällä hetkellä taisteluilma-aluksilla operoivat osapuolet kuitenkin useimmiten omaavat täydellisen ilmaherruuden alueellaan ja täten kykenevät operoimaan niillä kuten tahtovat.

Nykyajan monimuotoiseen sodankäyntitapaan vedoten uhkaksi täytyy todeta myös ei-aseistettujen kaupallisten lennokkien varustaminen taisteluvälineellä ja sen käyttäminen aseena. Tällaisia innovatiivisia ratkaisuja itse rakennetusta täsmäaseesta on käyttänyt esimerkiksi ISIS-järjestö Syyrian sodassa [34]. Myös tietotekniikan haavoittuvuudesta johtuva aluksen ohjauksen hakkeroinnin mahdollisuus voidaan nähdä uhkakuvana miehittämättömien järjestelmien käytölle. Mikäli vastustaja saa hallinnan toisen osapuolen aluksista se sekä kykenee käyttämään niitä heitä itseään vastaan sekä saamaan haltuunsa teknologiaa, jota sillä ei mahdollisesti olisi omilla resursseillaan varaa hankkia tai kehittää.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1. Tulosten arviointi

Tämän tutkielman tarkoituksena oli selvittää taisteluilma-alusten nykytilaa ja niiden käyttöä taistelukentällä tekniseltä kannalta tarkasteltuna. Työn luonteen johdosta tarkastelu kohdistui pääosin järjestelmien osien tutkimiseen ja niiden toiminnan selventämiseen osana kokonaisuutta. Rajauksista huolimatta käsiteltävän aihealueen alle jää niin paljon kalustoa, että yleisen kuvan luomiseksi on mielekkäämpää käsitellä aihepiiriä muutaman esimerkin kautta ja pohtia järjestelmien yleisiä ominaisuuksia kuin käydä läpi tekninen katsaus mahdollisimman useasta kyseisen järjestelmätyypin edustajasta.

Tutkielman pääkysymys oli:

Millaisia ovat autonomisia piirteitä omaavat taisteluilma-alukset?

Päätutkimuskysymykseen haettiin vastausta kolmen alakysymyksen avulla. Alakysymyksillä pyrittiin taustoittamaan tutkimuksen pääongelmaa ja luomaan tutkijalle edellytykset muodostaa kuva nykyaikaisella taistelukentällä käytettävien taisteluilma-alusten mahdollisuuksista ja rajoitteista.

Apukysymykset olivat:

1. Miten autonomiaa voidaan luokitella ja mitata taisteluilma-aluksissa?
2. Millaisia taisteluilma-alukset ovat tekniseltä rakenteeltaan?
3. Mihin taisteluilma-aluksia käytetään nykyajan taistelukentällä?

Ensimmäiseen kysymykseen saatiin tulokseksi että yhdenmukaista ja standardoitua mittajärjestelmää asejärjestelmää käyttävien ilma-alusten autonomisuuden määrittelemiseksi ei ole olemassa. Autonomia voidaan määritellä järjestelmän kyvyksi tehdä päätöksiä omasta toiminnastaan ja teoistaan. Yhdysvaltain ilmavoimien luoma kymmenportainen järjestelmä autonomisuuden luokitukselle on ainut julkisten lähteiden tarjoama luokitustapa miehittämättömien lentävien lavettien tapauksessa. Vertailukohdaksi käytettiin autoteollisuudessa käytettyä kuusiportaista asteikkoa. Vertailun mukaan luokittelut sisältävät samankaltaisia piirteitä ja ohjaavana tekijänä on järjestelmän valta päättää suoritettavista toimenpiteistä. Huomattavaa on kuitenkin kummankin luokitusjärjestelmän osalta se, että vasta korkeimmalla mahdollisella tasolla ihminen ei kykene puuttumaan järjestelmän toimintaan milteen osin.

Toinen ongelmallinen asia tutkittaessa taisteluilma-alusten autonomiaa on se, että eri osajärjestelmien autonomian tasot saattavat poiketa rajusti toisistaan. Tällöin koko järjestelmän autonomisen tason määrittäminen on hankalaa, tulkinnanvaraista ja riippuu eri osa-alueiden painotuksista. Varsinkin asejärjestelmät halutaan pitää mahdollisimman paljon ihmisen hallinnassa, vaikka alus kykenisi itsenäiseen lentoon ja kommunikointiin muiden ympärillä olevien järjestelmien kanssa. Tämä johtuu halusta pitää tappavan voiman käyttö ihmisen tekemän päätöksen takana. Itsenäisesti taistelulatausta käyttävä ase kuten IAI Harpy on suunniteltu osumaan hyvin tarkasti määriteltyn maaliin, sen tapauksessa tiettyä signaalia lähettävään tutkaan.

Toista apukysymystä tarkasteltiin taisteluilma-aluksen eri osien perusteella. Vastauksena alakysymykseen on että alus koostuu voi koostua lukuisista eri osajärjestelmistä, joiden integroitu suorituskyky ja tehokkuus korreloivat pitkälti laitteen autonomisen tason kanssa.

Taisteluilma-alukseen voidaan sen tehtävän ja käyttötarkoituksen mukaan integroida monia eri osajärjestelmiä, joita ovat esimerkiksi:

- erilaiset kamerat (TV, lämpö, valonvahvistin, mustavalko-tv)
- tutkat (SAR, seurantatutka)
- asejärjestelmät (ohjukset, pommit, täsmäaseet, miinat, improvisoidut räjähteet)
- laseretäisyysmittarit ja laservalaisimet
- radiolähettimet ja -vastaanottimet
- integrointia ja toiminnan synkronointia ohjaava tietokone

Taisteluilma-aluksen teknisen rakenteen monimutkaisuus selittyykin hyvin pitkälti siihen integroitujen osajärjestelmien määrän perusteella. Myös rakenteen perusteella voidaan tehdä perusteltuja olettamuksia järjestelmän autonomian tasosta, sillä itsenäiseen toimintaan kykenevä järjestelmä tarvitsee paljon tilaa kaikille sensoreilleen. Poikkeuksena tästä voidaan pitää parveilevaa järjestelmää, jonka yksittäinen lavetti voi olla hyvinkin pieni, mutta parven jopa sadat yksilöt jakavat yhteisen tilannetiedon ja tekevät päätöksiä sen perusteella. Parveileva järjestelmä on esimerkki hajautetusta autonomiasta, jos sitä käsitellään yhtenä kokonaisuutena.

Taisteluilma-alusten lavetteja on myös kahta erityyppistä kuten ilma-aluksissa muutenkin: kiinteä- ja pyöriväsiipiset. Nämä eivät poikkea toisistaan lentämisen mahdollistavan fysikaalisen ilmiön osalta. Kuitenkin liikehtimisessä on nähtävissä huima ero näiden kahden ratkaisun välillä. Kiinteäsiipisen on pysyttävä jatkuvasti liikkeessä, jotta nostovoima kykenee pitämään sen ilmassa, kun taas pyöriväsiipinen voi leijua myös paikallaan ja tehdä erittäin nopeita suunnanmuutoksia. Kaikki operatiivisessa käytössä olevat taisteluilma-alukset ovat kuitenkin kiinteäsiipisiä ja pyöriväsiipisiä on käytetty terroritarkoituksissa [34] ja tutkiessa parveilevien järjestelmien käyttöä.

Haettaessa vastausta kolmanteen apukysymykseen selvisi taisteluilma-alusten käytön monipuolisuus erityyppisiin tehtäviin. Järjestelmien tehtäväkohtainen räätälöitävyys ja monipuoliset lavettiratkaisut mahdollistavat alusten hyödyntämisen useassa eri toimintaympäristössä, olosuhteissa ja tehtävässä. Näitä ovat esimerkiksi:

- tiedustelu- ja valvonta
- tarkkailu
- tuhoamistehtävät
- paikannus
- maalinosoitus
- suojaaminen
- lähitulituki

Järjestelmien monipuolisuus ja jatkuva kehittäminen takaavat myös sen, että tulevaisuudessa taisteluilma-aluksia tullaan yhä enenevässä määrin erityyppisissä tehtävissä. Niitä voidaan erityisen hyvin käyttää myös paikoissa, jonne ihmisen on erittäin vaarallista mennä (vihollisen selustassa, luoksepääsemättömillä paikoilla tai esimerkiksi luonnonkatastrofin keskellä).

Päätutkimuskysymykseen vastaamista varten koottiin yhteen alakysymysten antamat tiedot, jonka jälkeen tehtiin SWOT-analyysi taisteluilma-alusten vahvuuksista, heikkouksista, uhkista ja mahdollisuuksista. Analyysillä pyrittiin selvittämään mitä annettavaa taisteluilma-aluksilla on nykyaikaiselle sodankäynnille ja mitkä asiat näyttäytyvät mahdollisesti negatiivisena niiden käytössä.

Analyysin perusteella taisteluilma-alusten suurimmat vahvuudet ovat mahdollisuudessa suorittaa useita erityyppisiä tehtäviä ja pitkäaikaisessa uhkavaikutuksessa kohdealueella. Myös henkilöstötappioiden välttäminen järjestelmän välityksellä operoitaessa voidaan laskea tämän tyyppisten alusten vahvuuksiin. Juuri näihin tavoitteisiin on pyrittykin pääsemään investoitaessa miehittämättömien järjestelmien kehitykseen.

Heikkoudet alusten käytössä löytyivät operaattoreiden osaamisesta ja heidän ylityöllistetyistä roolistaan erityisesti MQ-9 Reaperin osalta. Myös lavettien kyky ottaa melko heikko hyötykuorma voidaan laskea tämän kaltaisten alusten heikkoudeksi. Lisäksi järjestelmien hinta on melko korkea.

Mahdollisuuksia tarjoaa erityisesti teknologian kehittyminen, jolloin järjestelmien valmistaminen ja kehittäminen on halvempaa ja helpompaa. Taisteluilma-alusten mahdollisesti tullessa laajemmin käyttöön voidaan myös tiettyjä tehtäviä (tiedustelu ja valvonta) suorittaa koneiden, eikä ihmisten toimesta ja täten vapauttaa resursseja muuhun käyttöön.

Uhkia autonomisten alusten käytön yleistymiselle tai suuremmalle itsenäisyydelle löytyi vastustuksesta luovuttaa päätösvaltaa järjestelmälle ja teknologian epävarmuudesta. Myös ulkopuolisen tunkeutuminen ja järjestelmän kääntäminen itseään vastaan voi olla mahdollista.

Taisteluilma-alukset ovat hyvin monipuolinen ryhmä, jonka edustajia on vaikea laittaa yhden yläkäsitteen alle muuten kuin miehittämättömänä operoidessaan olevan toimintatapansa perusteella. Vaikuttaminen kohteeseen voi olla hyvin monimuotoista täsmäpommista elektroniiseen vaikuttamiseen. Näiden järjestelmien mahdollisuudet ja käyttöperiaatteet eivät kuitenkaan merkittävästi poikkea toisistaan, sillä ne ovat yleensä varusteltavissa useanlaisiin tehtäviin hyötykuorman toimiessa rajoittavana tekijänä.

Kokonaisuudessa voidaan todeta taisteluilma-alusten olevan nykyajan voimakkaimmin kehitymässä olevia järjestelmiä ja niiden tulevan voimakkaasti yleistyvän osana tulevaisuuden sodankäyntiä. Järjestelmien monipuolisuus ja kyky suorittaa monipuolisesti eri tehtäviä ovat avainasemassa niiden hyödyntämisessä sodankäynnin eri osa-alueilla. Kuitenkin täysin autonomisten järjestelmien kehittäminen on vielä tulevaisuutta, sillä ihminen halutaan pitää päätöksenteossa mukana (man-in-the-loop).

5.2. Tieteellisen kontribuution arviointi

Tässä työssä paneuduttiin rajaustenkin jälkeen melko laajaan aihealueeseen, jonka seurauksena siinä ei tarkastella yksityiskohtaisesti minkään tietyn järjestelmän tarkkoja tietoja ja suoritusarvoja. Tarkoituksena on kuvata tietäntyyppisten autonomisten järjestelmien toimintaa yleisellä tasolla ja ainoastaan havainnollistaa esimerkkien avulla järjestelmien toimintaa sekä ominaisuuksia. Pyrkimyksenä on antaa yleinen kuvaus taisteluilma-alusten toiminnasta ja käytöstä nykyaikaisella taistelukentällä.

Järjestelmien toiminnasta tai niiden tekniikasta ei tuotu ilmi mitään uutta tai mullistavaa ja tavoitteena onkin, että aiheen piiristä mahdollista jatkotutkimusta tekevät voivat saada ideoita tai hyödyntää tämän tutkielman antia ja syventää tietämystä tarkennetussa viitekehyksessä. Yleiskatsaus järjestelmien toiminnasta ja käyttömahdollisuuksista mahdollistaa pohjatietojen hankkimisen.

Alkuperäisen aiheen ollessa ”Autonomiset järjestelmät taistelussa” on aihealuetta rajattu todella paljon ja tällaisenaan tutkielma tarjoaa yleiskuvan ilmasta toimivista aseelliseen vaikutukseen pyrkivistä järjestelmistä. Aiheen tarkempi tutkimus tulee laajentamaan tietämystä ja tarkastelemaan muun tyyppisiä järjestelmiä

5.3. Lähdekritiikki

Tutkielma on tehty ainoastaan julkisia lähteitä käyttäen. Tällöin on oletettavaa että tarkkojen tietojen ja suoritusarvojen lukemia tulee pitää suuntaa-antavina kaikilta osin. Valmistajat ja järjestelmien käyttäjät eivät luonnollisestikaan halua julkistaa niistä täysin tarkkoja tietoja. Niinpä tutkielmassa esitettyjä tietoja voi pitää esimerkkeinä kyseisen luokan järjestelmän kyvyistä.

Lähteissä on käytetty yleistä alan kirjallisuutta, jonka tietojen voidaan olettaa pitävän melko lähelle paikkansa. Verkkojulkaisujen ja artikkelien kohdalla on syytä suhtautua varauksella niiden antamiin tietoihin. Internet-lähteissäkin on kuitenkin asiatiedot pyritty lainaamaan luotettavaksi arvioiduilta sivustoilta (hallinto, sanomalehdet, puolustusasioihin keskittyneet suuret verkkojulkaisut).

Kokonaisuudessaan työn pitäminen julkisella tasolla ei mahdollista paneutumista tarkkoihin tietoihin ja järjestelmien yksityiskohtiin. Tutkielman tarkoituksena on ollut luoda kuva taisteluilma-aluksista ja niiden käytöstä sellaisena kuin julkiset lähteet sen kertovat. Myöskään tämän kaltaisten aseiden käytön eettiseen puoleen ei oteta kantaa, sillä siinä keskustelussa näkemykset eivät välttämättä pohjaudu tosiasioihin vaan ideologiaan.

5.4. Jatkotutkimus

Aihepiiri on laaja ja sen kattava käsittely ei tämän kokoluokan tutkielmassa onnistu. Aihepiiri tarjoaa kuitenkin runsaasti mahdollisuuksia ja haasteita tutkimukselle. Taisteluilma-alusten osalta voi tutkimusta lähteä syventämään useastakin eri aiheesta, jota tässäkin tutkielmassa on sivuttu.

1. **Asejärjestelmien autonomia** – Kuinka eri asejärjestelmien autonomista tasoa voidaan luokitella vertailukelpoisesti? Nykyiset julkiset luokitukset eivät ota kantaa asejärjestelmien käytön autonomian luokitukseen. Tarkasteltavia esimerkkejä voisivat olla esimerkiksi tappavaa voimaa käyttävät, omasuojajärjestelmät, ohjustorjunta ja eri puolustushaarojen käyttämät itsenäisesti toimivat asejärjestelmät kuten esimerkiksi miinatorpedot.
2. **UCAV-järjestelmien sensorit** – Minkälaisia sensoreita taisteluilma-alus käyttää ja mikä on niiden suorituskyky? Miten sensoreiden integrointi ja ohjaus on toteutettu? Tässä tutkielmassa käsiteltiin vain yleisesti mitä sensoreita järjestelmissä voi olla kiinnitettynä, tarkemmassa tutkimuksessa voisi ottaa kantaa esimerkiksi eri sensoreiden tarkempaan suorituskykyihin.
3. **Parveilevat asejärjestelmät** – Nykyisellään julkiset lähteet tarjoavat kovin vähän tietoa näiden toiminnasta. Mihin kaikkiin tehtävätyyppeihin näitä olisi mahdollista käyttää? Kuinka pienet lavetit voidaan aseistaa ja miten tällä aseistuksella voi toimia kohdetta vastaan? Miten parven ryhmä-äly toimii? Tämän aihepiirin ympärillä tulee varmasti kiintoisia aiheita eteen, sillä kyseessä on niin tuore alue.
4. **Taisteluilma-alusten suojautuminen vastatoimilta** – Miten tutkilta suojautuminen on toteutettu tämän tyyppisissä aluksissa? Mitä keinoja aluksella on puolustautua mahdollisilta vastatoimilta? Nykyisellään alukset toimivat yleensä ilmatilassa, jossa niihin kohdistetun vaikuttamisen todennäköisyys on pieni. Järjestelmien yleistyessä niiden tulee kyetä myös suojautumaan ja toimimaan hyökkääjää vastaan. Mitä mahdollisuuksia tai heikkouksia järjestelmillä on tällaiseen toimintaan?

LÄHTEET

- [1] AreSpaceWeb.org [Verkkojulkaisu] *Helicopter Yaw Control Methods* [Viitattu 2.4.2018] Saatavissa: <http://www.aerospaceweb.org/question/helicopters/q0034.shtml>
- [2] Breaking Defence [verkkojulkaisu] *How to Cut Predator, Reaper UAV Crew in Half* [Viitattu 23.3.2018] Saatavissa: <https://breakingdefense.com/2015/10/how-to-cut-predator-reaper-uav-crew-in-half-lt-gen-otto/>
- [3] Cambone, S. Krieg, K. Pace, P. Wells II, L *Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap 2005-2030*. Office of the Secretary of Defence, 4.8.2015
- [4] Clark, R.M., *Uninhabited Combat Aerial Vehicles: Airpower By The People, For The People, But Not With The People*, School of advanced airpower studies Air University, Maxwell Air Force Space, 1999
- [5] Clough, Bruce (August 2002). *"Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway?"* (PDF). US Air Force Research Laboratory. Saatavilla : <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a515926.pdf>
- [6] Defence News [Verkkojulkaisu] *US Army to Demo Robotic Wingman Vehicles in 2017* [Viitattu 2.4.2018] Saatavissa: <https://www.defensenews.com/land/2016/12/28/us-army-to-demo-robotic-wingman-vehicles-in-2017/>
- [7] Defence Update [verkkojulkaisu] *MQ-9 Reaper Hunter/Killer UAV* [Viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: <http://www.defense-update.com/products/p/predatorB.htm>
- [8] Defence Update. [Verkkojulkaisu] *IAI introduces new loitering weapons for anti-radiation, precision strike*. [Viitattu 14.2.2017]. Saatavissa http://defense-update.com/20160215_loitering-weapons.html
- [9] Department of Defence, *Fiscal Year (FY) 2013 President's Budget Submission*, Department of the Air Force USA, February 2012
- [10] Department of Electrical and Communication Engineering [Verkkojulkaisu] *Introduction to Radar Systems* [Viitattu 2.4.2018] Saatavissa: [http://mmust.elimu.net/BSC\(ELEC_COMM\)/Year_4/ECE%20451%20L_Radar_Eng_and_Facsimile/Introduction_to_Radar/Introduction_to_Radar.htm](http://mmust.elimu.net/BSC(ELEC_COMM)/Year_4/ECE%20451%20L_Radar_Eng_and_Facsimile/Introduction_to_Radar/Introduction_to_Radar.htm)

- [11] Digital Trends [Verkkajulkaisu] *The Sound of 103 Micro Drones Launched From F/A-18 Will Give You Nightmares* [Viitattu 30.3.2018] Saatavilla: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/perdix-drone-swarm/>
- [12] FlightLearnings [Verkkajulkaisu] *Types of Turbine Engines* [Viitattu 1.4.2018] Saatavissa: <http://www.flightlearnings.com/2010/03/06/types-of-turbine-engines/>
- [13] Ilmailutoimittajat [Verkkajulkaisu] *Ilmailun mediatietoa* [Viitattu 1.4.2018] Saatavissa: www.ilmailutoimittajat.fi/Infoa/MediaOpasX.pdf
- [14] Infradex [Verkkajulkaisu] *Lämpösäteily ja infrapuna* [Viitattu 27.3.2018] Saatavissa <https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera/>
- [15] J3016_201609 SAE International Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (Standard), 2016
- [16] Jane's tietokanta. [Verkkajulkaisu]. *IAI HAROP*. [Viitattu 28.2.2017]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1318801>
- [17] Jane's tietokanta. [Verkkajulkaisu]. *IAI HARPY*. [Viitattu 14.2.2017]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1317898>
- [18] Kosola Jyri. Solante Tero. *Digitaalinen taistelukenttä. Informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2003. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, julkaisusarja 1 no 13. 533s. ISBN 951-25-1449-4
- [19] Kosola Jyri. *Tappajarobotit tulevat! Vai tulevatko?*. Sotilasaikakauslehti syyskuu 2018
- [20] Kosola Jyri. *Vaanivat aseet jäädyttävät toiminnan*. Sotilasaikakauslehti syyskuu 2016
- [21] Lentoposti.fi [Verkkajulkaisu] *USA:n puolustusvoimat testannut onnistuneesti 103:n minilennokin itsenäistä parveilua* [Viitattu 2.4.2018] Saatavilla: http://www.lentoposti.fi/uutiset/usan_puolustusvoimat_testannut_onnistuneesti_103n_minilennokin_itsenaista_parveilua_video
- [22] Military.com [verkkajulkaisu] *SOCOM Wants to Deploy MQ-9 Drones to Remote Areas* [Viitattu 23.3.2018]. Saatavissa: <https://www.military.com/daily-news/2013/09/16/socom-wants-to-deploy-mq9-drones-to-remote-areas.html?ESRC=todayinmil.sm>
- [23] NASA [Verkkajulkaisu] *Turboprop Engine* [Viitattu 30.3.2018] Saatavissa: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/Animation/turbtyp/etpm.html>
- [24] NASA [Verkkajulkaisu] *What Is Lift?* [Viitattu 2.4.2018], Saatavissa: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lift1.html>

- [25] Navaldrone [Verkkajulkaisu] *Perdix* [Viitattu 2.4.2018] Saatavilla:
<http://www.navaldrone.com/perdix.html>
- [26] Naziabomb.[Verkkajulkaisu] *How the Nazi A-bomb worked*, [Viitattu 6.2.2018]
<https://sites.google.com/site/naziabomb/home/how-the-nazi-a-bomb-worked>
- [27] Office of the Secretary of Defence, The Strategic Capabilities Office [Verkkajulkaisu] *Perdix Fact Sheet* [Viitattu 2.4.2018] Saatavilla:
<https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=12&ved=0ahUK EwiSwbCYxJvA-hUFepoKHHW9A9sQFghpMAs&url=https%3A%2F%2Fwww.defense.gov%2FPortals%2F1%2FDocuments%2Fpubs%2FPerdix%2520Fact%2520Sheet.pdf&usg=AOv Vaw2iwzNYu3x0EQz-nd3skbm3>
- [28] Popular Mechanics [Verkkajulkaisu] *The Best 7 Drones For Anyone Looking to Get Airborne* [Viitattu 3.4.2018] Saatavilla:
<https://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/g2983/the-best-drones-review/>
- [29] Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, osa 1 Teknologian kehitys*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2008. ISBN 978-951-25-1888-3
- [30] Rongland [Verkkajulkaisu] *Image Intensifier Tubes – How It Works* [Viitattu 2.4.2018] Saatavilla: <https://rongland.co.uk/blogs/news/image-intensifier-tubes-how-it-works>
- [31] Skolnik, Merrill, I. *Introduction to Radar Systems* ISBN 0-07-057909-1
- [32] Suomen riskienhallintayhdistys [verkkajulkaisu] *Nelikenttöanalyysi SWOT* [Viitattu 22.3.2018] Saatavissa <https://www.pk-rh.fi/tools/swot.html>
- [33] The Guardian [verkkajulkaisu] *Life as a Drone Operator: “Ever Step on Ants and Never Give it Another Thought?”* [Viitattu 23.3.2018] Saatavissa
<https://www.theguardian.com/world/2015/nov/18/life-as-a-drone-pilot-creech-air-force-base-nevada>
- [34] The Washington Post [Verkkajulkaisu] *ISIS Drones Are Attacking US Troops And Disrupting Airstrikes in Raqqa* [Viitattu 3.4.2018] Saatavilla:
https://www.washingtonpost.com/news/checkpoint/wp/2017/06/14/isis-drones-are-attacking-u-s-troops-and-disrupting-airstrikes-in-raqqa-officials-say/?utm_term=.da7c79e267d3

- [35] US Air Force [verkkojulkaisu] *Factsheets: MQ-9 Reaper* [Viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: <http://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104470/mq-9-reaper/>
- [36] Valkola, E. *Kirjallisuustutkimus tutkimusmenetelmänä*. Kirjassa: Lappalainen, E. & Jormakka, J. (toim.) Tekniset tutkimusmenetelmät maanpuolustuskorkeakoulussa. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. Julkaisusarja 5 nro 1 Helsinki: Edit Prima Oy, 2004. 42-49s. ISBN 951-25-1540-7.
- [37] Walters, W, *An Overview of the Shaped Charge Concept*, Mathematical Sciences Center of Excellence, Department of Mathematical Sciences, U. S. Military Academy, West Point, NY
- [38] West, G. *Drone On* [verkkojulkaisu]. Foreign Affairs, May/June Issue 2015. [viitattu 3.9.2017] Saatavissa: <https://www.foreignaffairs.com/articles/2015-05-01/drone>
- [39] Wikipedia [Verkkojulkaisu] *General Atomics MQ-1 Predator*. [Viitattu 28.2.2017]. Saatavissa: https://fi.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator
- [40] Wikipedia [Verkkojulkaisu] *Laseretäisyysmittari*. [Viitattu 30.3.2018]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Laseret%C3%A4isyysmittari>
- [41] Wikipedia [Verkkojulkaisu] *Maalinosoituslaser*. [Viitattu 30.3.2018]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Maalinosoituslaser>
- [42] Wikipedia [Verkkojulkaisu] *Potkuri*. [Viitattu 30.3.2018]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Potkuri>
- [43] Wikipedia [Verkkojulkaisu] *Tietokone*. [Viitattu 30.3.2018]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Tietokone>
- [44] Wikipedia [Verkkojulkaisu] *Unmanned aerial vehicle*. [Viitattu 28.2.2017]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle
- [45] Vladimír BEŇO, František ADAMČÍK Jr. *Unmanned Combat Air Vehicle: MQ-9 Reaper*. INTERNATIONAL CONFERENCE of SCIENTIFIC PAPER AFASES 2014 Brasov, 22-24 May 2014
- [46] Wordpress.com [Verkkojulkaisu] *Mittausmenetelmät* [Viitattu 1.4.2018] Saatavissa: <https://mittausmenetelmat.wordpress.com/>
- [47] *Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas*., Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus 2001, 391s, ISBN 951-25-1277-7
- [48] Ynet news [Verkkojulkaisu] *The Missile That Looks Like a UAV* [Viitattu 3.4.2018] Saatavissa: <https://www.ynetnews.com/articles/0,7340,L-4767278,00.html>